บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบในปริมาณต่างๆ กัน ดังข้อกำหนดในการวิจัย โดยแยกออกเป็นหัวข้อใหญ่ ๆ คือ

- คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ
- คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ

หัวข้อของคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ จะแสดงถึงส่วนประกอบทางเคมี การจำแนกเป็นชนิดของวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติชนิดใด ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุทุกตัวในการวิจัย

หัวข้อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ จะแสดงถึงความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัว กำลังแรงอัด ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลาน และผลของการ X - Ray Diffraction ของการทดสอบตัวอย่างในแต่ละส่วนผสมที่กำหนดให้

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

4.1.1 ส่วนประกอบทางเคมี ของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีส่วนประกอบทางเคมีหลักคือ คัลเซียม (CaO) ซิลิก้า (SiO_2) อลูมิน่า (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) และอนุมูลซัลเฟต (SO_3) มีค่าเป็น 63.82 , 20.20 , 5.42 , 2.92 และ 2.55 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และส่วนประกอบทางเคมีอื่น ๆ เช่น แมกนิเซียม (MgO), โซเดียม (Na_2O), โปตัสเซียม (K_2O)

4.1.1.2 ขี้เถ้าลอย มีส่วนประกอบทางเคมีหลักคือ ซิลิก้า (SiO_2) คัลเซียม (CaO) อลูมิน่า (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) และอนุมูลซัลเฟต (SO_3) มีค่าเป็น 35.43 , 11.92 , 28.27 , 14.57 และ ($SiO + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) มีค่าเท่ากับ 78.27 เปอร์เซนต์

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุวิจัย

ส่วนประกอบทางเคมีในรูปของออกไซด์	ส่วนประกอบทางเคมี ปริมาณเปอร์เซนต์		
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ขี้เถ้าลอย	ขี้เถ้าแกลบ
SiO_2	20.20	35.43	94.80
CaO	63.82	11.92	0.40
Al_2O_3	5.42	28.27	1.27
Fe_2O_3	2.92	14.57	0.20
MgO	1.50	2.13	0.20
K_2O	0.46	2.48	1.26
MnO_2	-	0.11	0.14
TiO_2	-	0.38	0.03
So_3	2.55	2.35	0.08
ZnO	-	0.01	-
PbO	-	0.04	-
ZrO_2	-	-	0.01
SrO	-	0.09	-
Na_2O	0.26	-	0.20
CuO	-	0.05	-

ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าผลรวมนี้ตามมาตรฐาน สารประกอบของวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติ ASTM C 618 จริง ตามชนิดของวัสดุผสม N หรือ F และส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น แม็กนิเซียม (MgO) โปตัสเซียม (K_2O) แมงกานิส (MnO_2) โซเดียม (Na_2O)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1.3 ขี้เถ้าแกลบ ขี้เถ้าแกลบมีส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ส่วนประกอบหลักคือ ซิลิก้า (SiO_2) คัลเซียม (CaO) อลูมิน่า (Al_2O_3) เหล็ก (Fe_2O_3) และอนุมูลซัลเฟต (SO_3) มีค่าเป็น 94.80 , 0.40 , 1.27 , 0.20 และ 0.08 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ผลรวมของ ซิลิก้า อลูมิน่า และเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) มีค่าเท่ากับ 96.57 เปอร์เซนต์

เปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าแกลบ พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีคัลเซียม (CaO) เป็นส่วนใหญ่ คือ มีคัลเซียมถึง 63.82 เปอร์เซนต์ มากกว่าในขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ แต่มีผลรวมของ ซิลิก้า อลูมิน่า และ เหล็ก ($Sio_2 + AI_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับ 28.54 เปอร์เซนต์เท่านั้น ซึ่งสารประกอบส่วนนี้ จะทำปฏิกริยาทางเคมีโดยรวมกับ คัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] เกิดเป็นสารเชื่อมประสาน ส่วนขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ กลับมีซิลิก้า (SiO_2) เป็นส่วนใหญ่ คือ มี 35.43 และ 94.80 เปอร์เซนต์ตามลำดับ และมีผลรวมของ ซิลิก้า อลูมิน่าและเหล็ก ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) เท่ากับ 78.27 และ 96.27 เปอร์เซนต์ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนที่จะไปทำปฏิกริยาทางเคมีกับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือ คือสารที่จะก่อให้เกิดปฏิกริยาปัซโซลาน แต่ทั้งขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบมีคัลเซียมน้อยมาก เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอยจึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นถ้าพิจารณาจากปริมาณของผลรวมของ ซิลิก้า อลูมิน่าและเหล็ก จะพบว่าขี้เถ้าแกลบมีปริมาณมากกว่าขี้เถ้าลอย จึงคาดว่าจะมีแนวโน้มว่าขี้เถ้าแกลบน่าที่จะทำให้เกิดปฏิกริยาปัซโซลานมากกว่าขี้เถ้าลอย แต่ผลของการทดลองจริงกลับไม่เป็นดังคาดนั้น เพราะผลที่เกิดปฏิกริยาปัซโซลานขึ้นอยู่กับขนาดความละเอียดและปริมาณคัลเซียมของขี้เถ้าลอย ขี้เถ้าแกลบ และปริมาณซิลิก้าที่มีจำนวนมากกว่าในขี้เถ้าแกลบ อาจไม่สามารถทำปฏิกริยากับคัลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้ทั้งหมด จำนวนของซิลิก้าที่มีอยู่ จากการศึกษาในอดีตพบว่า สารประกอบของขี้เถ้าจะมี 3 ลักษณะที่สำคัญรวมกันอยู่คือ ควอทซ์ (Quartz) มูลไลต์ (Mullite) และกล๊าส (glass) ซึ่งมีเฉพาะกล๊าสเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกริยาเคมีได้ดี แต่อีกสองลักษณะจะอยู่ในสภาพของผลึก (Crystal) ซึ่งทำปฏิกริยาทางเคมีได้น้อยมาก

4.1.1.4 ทราย ทรายมีส่วนประกอบทางเคมีเกือบทั้งหมดเป็น ซิลิก้า ซึ่งอยู่ในรูปของ ควอทซ์ (Quartz) ซึ่งเป็นสารเฉื่อยในการทำปฏิกริยาเคมี

4.1.1.5 น้ำ น้ำมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นที่รู้จักกันดี คือ ไฮโดรเจน (Hydrogen, H) สองส่วน และออกซิเจน (Oxygen, O) หนึ่งส่วน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่จะทำปฏิกริยากับคัลเซียม (CaO) ซึ่งจะก่อให้เกิดสารประกอบคัลเซียมไฮดรอกไซด์ [$Ca(OH)_2$] และน้ำที่ใช้ในการทดลอง หรือน้ำที่ใช้ในงานจริงโดยทั่วๆ ไปเป็นน้ำประปา

4.1.2 <u>ความละเอียด</u>

4.1.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การหาขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยการถ่ายภาพจากกล้อง Electron microscope ดังรูปที่ 4.1 ได้ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 49 ไมครอน (49μ หรือ 0.049 มม.) ซึ่งเล็กมากสามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้หมด และโดยสะดวก ซึ่งในสมัยแรกๆ ของการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ใช้มาตรฐานความละเอียด โดยร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 200 แต่ปัจจุบันขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่บดแล้วจะเล็กกว่า ขนาดช่องเปิดของตะแกรงเบอร์ 200 มาก

ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นี้ มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากคือ ถ้าขนาดอนุภาคเล็กก็สามารถทำปฏิกริยากับน้ำได้ดี แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กจนเกินไป ก็จะทำปฏิกริยากับความชื้นที่มีอยู่ในอากาศได้ และเกิดปฏิกริยากับความชื้นในอากาศนี้ไปก่อนการใช้งานจริง ทำให้ปูนซีเมนต์ที่มีอนุภาคละเอียดมากเกินไปเสื่อมคุณภาพง่าย

จากผลการทดสอบนี้โดย Electron microscope ระยะเวลาที่ผงซีเมนต์ที่ใช้ทดสอบถูกผลิตขึ้น จนถึงการถ่ายภาพหาขนาดของอนุภาค โดยระหว่างเวลานั้นผงปูนซีเมนต์ตัวอย่างก็อาจจะทำปฏิกริยากับความชื้นในอากาศไปบ้างแล้ว ขนาดที่ได้นี้อาจจะใหญ่กว่า ขนาดอนุภาคขณะที่ผลิตจากโรงงานเล็กน้อย

4.1.2.2 ขี้เถ้าลอย การหาขนาดอนุภาคของขี้เถ้าลอยทำโดยการถ่ายภาพจากกล้อง Electron microscope จากรูปที่ 4.2 พบว่า อนุภาคขี้เถ้าลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ผิวเรียบ ขนาด ประมาณ 7 ไมครอน (7 μ หรือ 0.007 มม.)

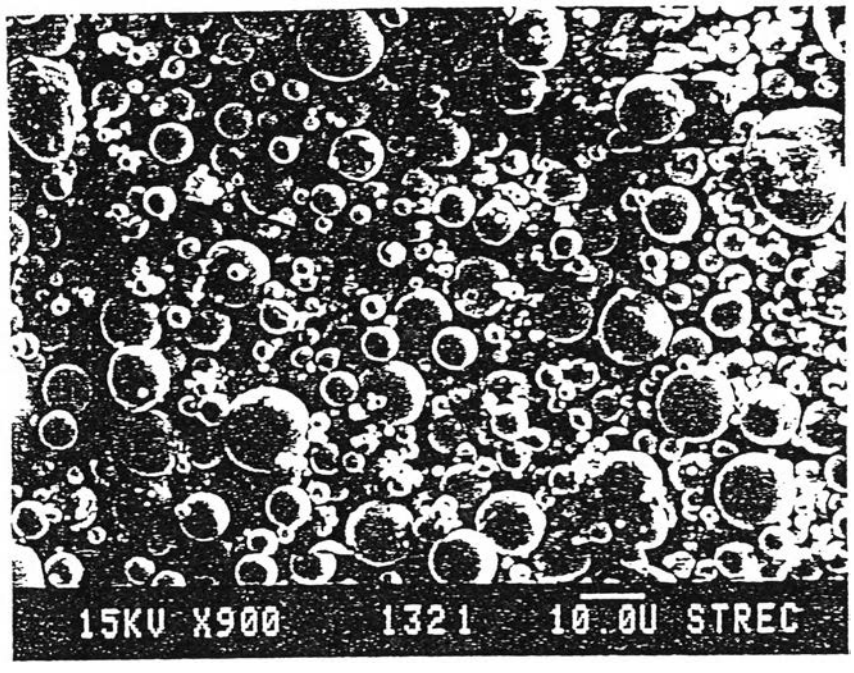
ขนาดอนุภาคขี้เถ้าลอยเล็กมาก ลักษณะที่เป็นทรงกลมผิวเรียบ ขนาดเล็กละเอียดนี้ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารผสมเพิ่ม (admixture) ที่ดีต่อคอนกรีตและมอร์ต้า เพราะขี้เถ้าลอยจะช่วยเพิ่มความสามารถทำงานได้ (workability) คือเพิ่มค่าความข้นเหลวปกติ (Normal consistency) ของส่วนผสม เพราะขนาดที่เป็นเม็ดๆ ของมวลหยาบและมวลละเอียดและซีเมนต์ จะทำให้เกิดช่องว่างในส่วนผสม (คอนกรีต และมอร์ต้า) และช่องว่างนี้ต้องการน้ำบรรจุให้เต็มช่องว่าง การเติมช่องว่างด้วยอนุภาคที่มีความละเอียดโดยเฉพาะขนาดอนุภาค 1-20 ไมครอน (0.020 มม.) จะมีผลอย่างมากในการลดปริมาณช่องว่างลง ทำให้ความต้องการน้ำ [W/(C + FLY ASH)] ลดลง

4.1.2.3 ขี้เถ้าแกลบ การหาขนาดอนุภาคของขี้เถ้าแกลบทำโดยการถ่ายภาพจากกล้อง Electron microscope จากรูปที่ 4.3 พบว่า อนุภาคขี้เถ้าแกลบมีลักษณะเป็นชิ้นๆ เหลี่ยมๆ ขนาดประมาณ 47 ไมครอน (47 μ หรือ 0.047 มม.)

ขี้เถ้าแกลบ มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับ อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ผงฝุ่นขี้เถ้าแกลบนี้ได้จากการบดผงขี้เถ้าแกลบที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (ขนาดช่องเปิด 0.42 มม) ในเครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

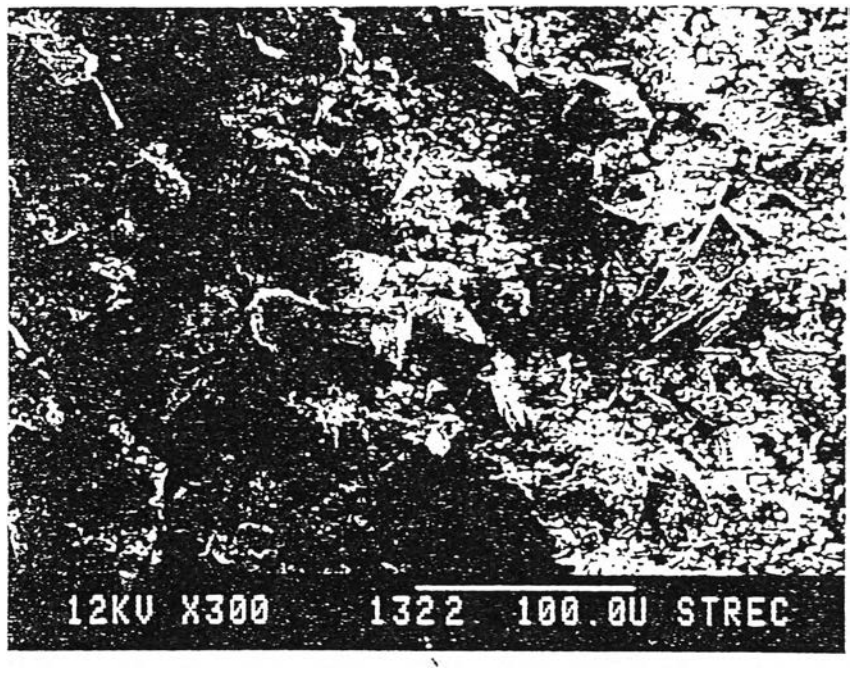
ขี้เถ้าแกลบ มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และรูปร่างของอนุภาคเป็นชิ้นเป็นเหลี่ยม ผิวไม่เรียบ และมีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทำให้ต้องใช้ปริมาณขี้เถ้าแกลบ มากกว่าปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ถูกแทนที่ เพราะการใช้ขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ทำการแทนที่โดยน้ำหนักดังนั้นทำให้มวลรวมของมอร์ต้าเพิ่มขึ้นมาก และไม่ช่วยลดปริมาณช่องว่างในมวลรวมของส่วนผสมมากนัก อีกทั้งลักษณะผิวที่ไม่เรียบและมีมุมมีเหลี่ยมก็ไม่ช่วยให้เกิดการลื่นไถลที่ดีแก่มวลรวมอื่นๆ จึงทำให้ความต้องการน้ำ [W/(C + RHA)] เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย Electron Microscope ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



0.01 มม.

รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย Electron Microscope ของขี้เถ้าลอย

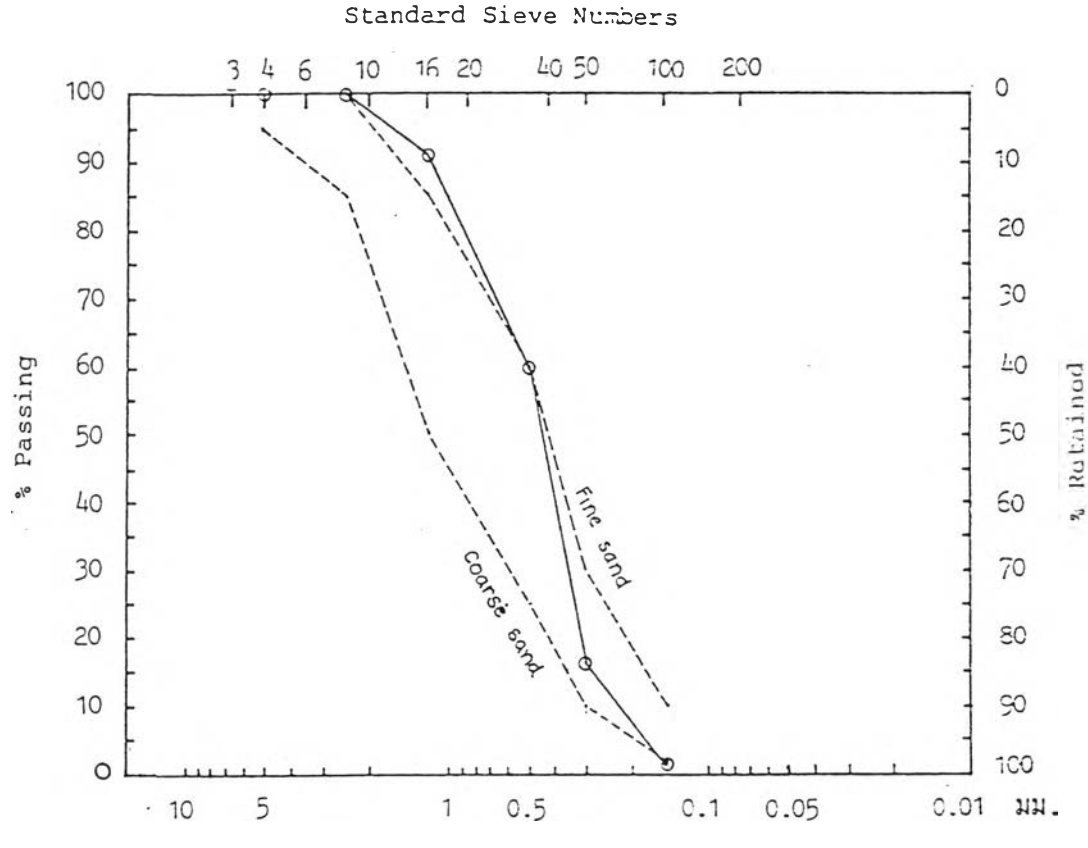


0.10 มม.

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย Electron Microscope ของขี้เถ้าแกลบ

4.1.2.4 ทราย การหาขนาดอนุภาคของทราย ทำการวิเคราะห์ด้วยตะแกรงมาตรฐาน (Sieves analysis) เทียบกับขนาดคละมาตรฐานของวัสดุผสมละเอียด จาก ASTM C 33 ผลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.4 จะพบว่าเส้นแสดงผลการวิเคราะห์ขนาดคละของทรายตัดและเลยออกไป ทางด้านเส้นแสดงทรายละเอียด (Fine Sand) อัตราพิกัดความละเอียดของทราย (Finess Modulus , F.M.) มีค่าเท่ากับ 2.3 ซึ่งปกติค่าอัตราพิกัดความละเอียดของทรายเท่ากับ 2.4 - 3.0 ดังนั้นผลของการวิเคราะห์ทั้งสอง แสดงว่าทรายที่ใช้ในการทดลองนี้มีความละเอียดกว่าทรายมาตรฐานเล็กน้อย

การเลือกใช้ทรายละเอียดกว่าทรายมาตรฐาน เพราะหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้ว ตัวอย่างลูกบาศก์มอร์ต้าจะต้องนำไปบดให้ได้ผงละเอียดขนาดเล็กกว่าตะแกรงเบอร์ 200 (0.074 มม.) เพื่อใช้วิเคราะห์โดยวิธี X-Ray Diffraction



รูปที่ 4.4 แสดงขนาดคละหรือความละเอียดของทราย ตามมาตราฐาน ASTM C 33

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

4.1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 จากการทดสอบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในน้ำมันก๊าด ตามมาตรฐาน ASTM C 188 - 84

4.1.3.2 ขี้เถ้าลอย มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.56 จากการทดสอบแทนที่ขี้เถ้าลอยในน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 128-79

4.1.3.3 ขี้เถ้าแกลบ มีความถ่วงจำเพาะ 2.04 จากการทดสอบการแทนที่ขี้เถ้าแกลบในน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 128 - 79

4.1.3.4 ทราย มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.64 จากการทดสอบการแทนที่ทรายในน้ำ ตามมาตรฐาน ASTM C 128 - 79

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของขี้เถ้าลอยเท่ากับ 2.56 ในขณะที่ขี้เถ้าลอยในต่างประเทศ ความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.1 - 2.4 เท่านั้น ค่าความถ่วงจำเพาะของ ขี้เถ้าลอยแม่เมาะมากกว่าขี้เถ้าลอยต่างประเทศ เพราะส่วนประกอบทางเคมีที่มีความหนาแน่นสูงได้แก่ เหล็ก (Fe_2O_3) อลูมิน่า (Al_2O_3) แม็กนิเซียม (MgO) และคัลเซียม (CaO) รวมประมาณ 56.9 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ขี้เถ้าลอยต่างประเทศมีสารประกอบส่วนใหญ่เป็นซิลิก้า (SiO_2) ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำประมาณ 45เปอร์เซนต์

แต่ในทางกลับกันขี้เถ้าแกลบมีสารประกอบส่วนใหญ่เป็น ซิลิก้า (SiO_2) ที่มีความหนาแน่นต่ำประมาณ 94.8 เปอร์เซนต์ ทำให้ขี้เถ้าแกลบมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในตัวอย่างทั้งหมด ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของขี้เถ้าแกลบจึงมีค่าน้อยกว่าขี้เถ้าลอยอื่นๆ คือ มีค่าเท่ากับ 2.04 เท่านั้น

4.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบ

4.2.1 ความข้นเหลวปกติ (Normal consistency)

ความข้นเหลวปกติเป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่ต้องการ ในส่วนผสมของมอร์ต้า

ตามมาตรฐาน ASTM C 230-83 โดยกำหนดค่าการไหลแผ่เท่ากับ 110 ± 5 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

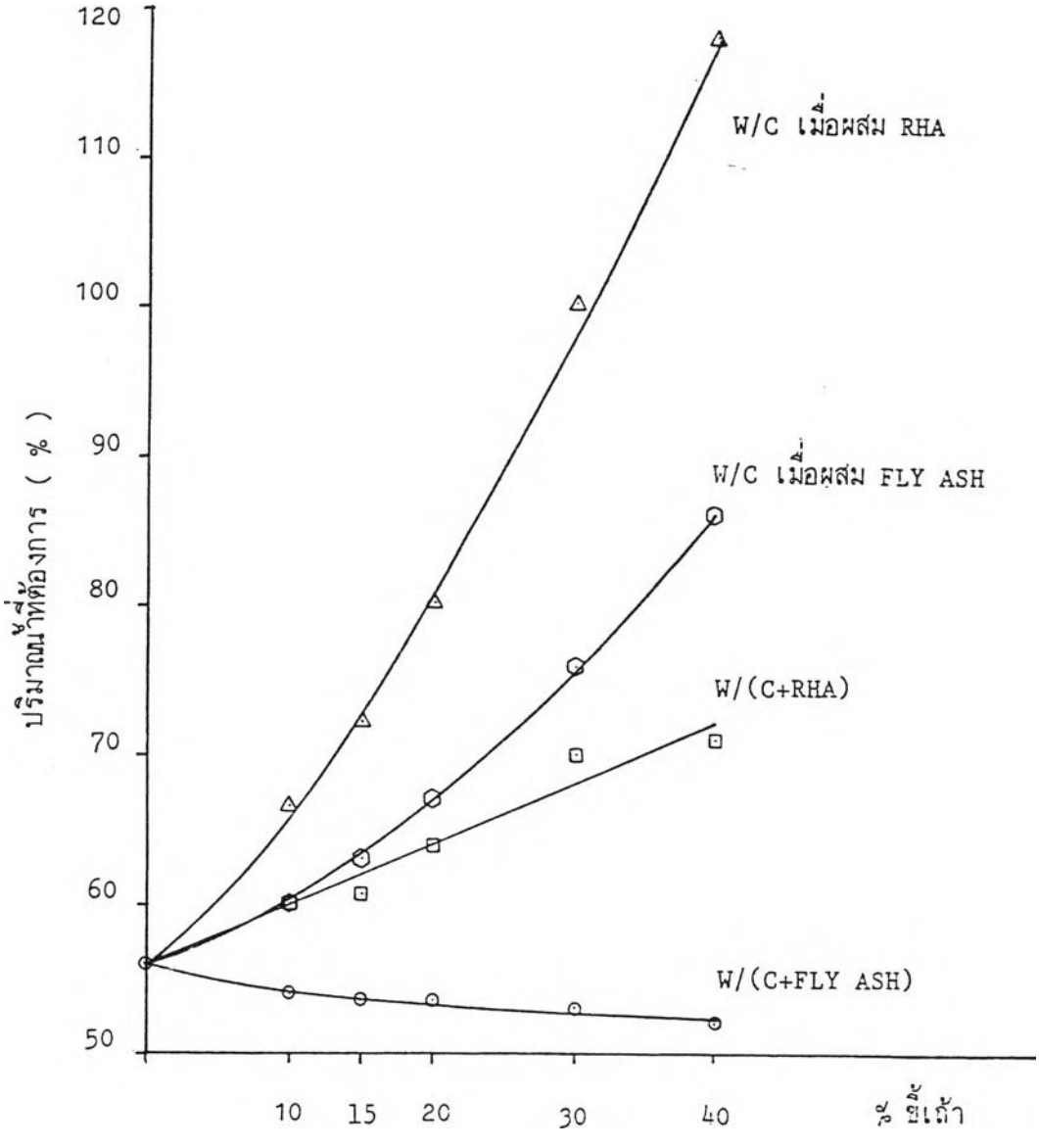
4.2.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนผสมมอร์ต้า ในอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 2.75 ได้ค่าปริมาณน้ำที่ต้องเท่ากับ 0.560 ของปูนซีเมนต์

4.2.1.2 ขี้เถ้าลอย เมื่อใช้ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเป็นจำนวน 10, 15 , 20 , 30 , และ 40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ได้ค่าปริมาณน้ำที่ต้องการ W/(c + FLY ASH) เท่ากับ 0.54 , 0.535 , 0.535 , 0.530 , 0.520 ของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ตารางที่ 4.2 และจะลด 0.01 ทุก ๆ 10% ของขี้เถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น และค่า W/c เท่ากับ 0.60, 0.629, 0.669, 0.757, 0.757, 0.867 ตามลำดับ คือค่า W/c จะเพิ่มขึ้น 0.055 ทุก ๆ 10% ของขี้เถ้าลอยที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบพบว่าค่าปริมาณน้ำที่ต้องการ [W/(C + FLY ASH)] ลดลงเล็กน้อย คือ ค่าความข้นเหลวจะดีขึ้น เพราะขนาดที่เป็นเม็ดของมวลหยาบ และมวลละเอียด และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะทำให้เกิดช่องว่างในส่วนผสม ซึ่งช่องว่างนี้ต้องการน้ำบรรจุให้เต็ม แต่ถ้าจะเติมช่องว่างนี้ด้วยวัสดุอื่น วัสดุนั้นควรมีขนาดอนุภาคประมาณ 1 - 20 ไมครอน ซึ่งจะให้ผลดีมาก ดังนั้น การผสมขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 7 ไมครอน และมีลักษณะกลมผิวเรียบ จะไปแทนที่ช่องว่างได้ดี และเป็นตัวช่วยให้มวลอื่นๆ ลื่นไถลได้ดี

4.2.1.3 ขี้เถ้าแกลบ เมื่อใช้ขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เป็นจำนวน 10 , 15 , 20 , 30 และ 40 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนัก ได้ค่าปริมาณน้ำที่ต้องการ [W/(c + RHA)] 0.60 , 0.615 , 0.640 , 0.670 และ 0.71 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 ตารางที่ 4.3 และจะเพิ่ม 0.038 ทุก ๆ 10% ของขี้เถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้นและค่า W/c เท่ากับ 0.667, 0.723, 0.800, 1.000, 1.183 ตามลำดับ คือค่า W/c จะเพิ่มขึ้น 0.127 ทุก 10% ของขี้เถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบ พบว่าค่าปริมาณน้ำที่ต้องการเพิ่มขึ้น คือค่าความข้นเหลวลง เนื่องจาก



รูปที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่ต้องการ จากค่าความข้นเหลวปกติ เมื่อผสมขี้เถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

อนุภาคของขี้เถ้าแกลบมีขนาด 47 ไมครอน ซึ่งใหญ่เกินไปไม่เหมาะสมในการแทนที่น้ำในช่องว่างของมวลรวมต่างๆ อีกทั้งรูปร่างของอนุภาคมีเหลี่ยมมีมุมซึ่งไม่ช่วยในการลื่นไถลของมวลอื่นๆ ให้ดีขึ้น

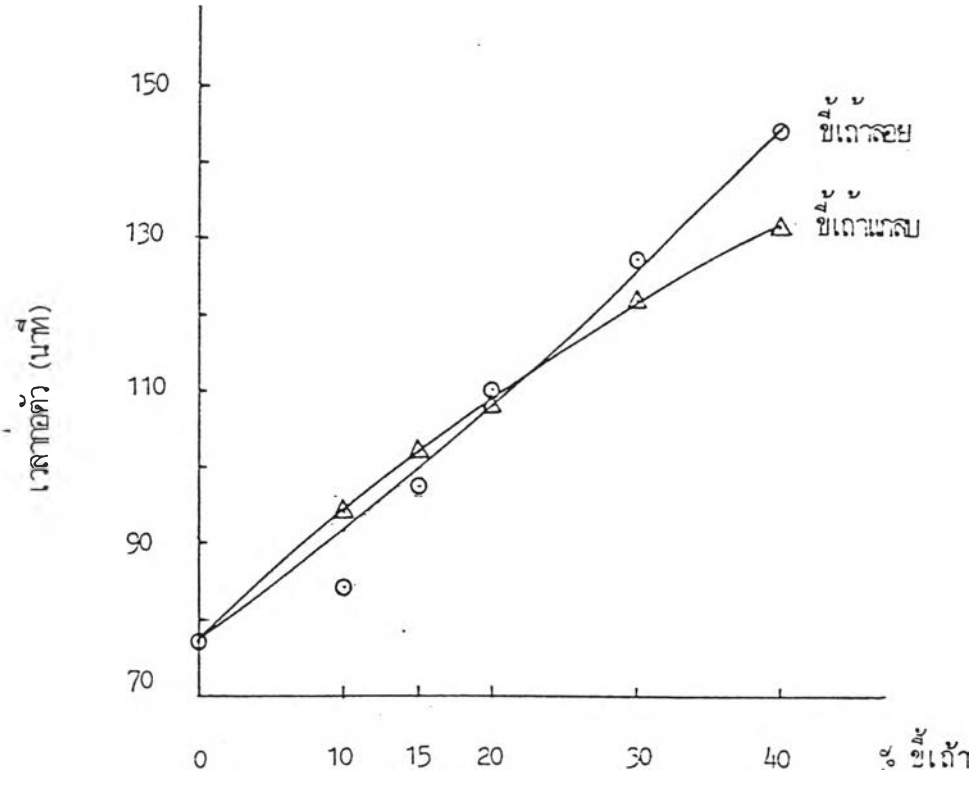
4.2.2 <u>ระยะเวลาก่อตัว</u> (Setting Time) ระยะเวลาก่อตัว คือ เวลาที่ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และน้ำ เปลี่ยนจากสภาพของเหลวไม่คืนตัว (plastic state) ไปเป็นก้อนแข็ง ทำการทดสอบโดยไวแคต (Vicat) ตามมาตรฐาน ASTM C 191-82 ดังแสดงในรูปที่ 4.6

4.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีระยะเวลาก่อตัว ประมาณ 77.4 นาที

4.2.2.2 ขี้เถ้าลอย เมื่อผสมขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เป็นจำนวน 10, 15 , 20 , 30 , และ 40 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักจะทำให้ส่วนผสมมีระยะเวลาการก่อตัวเท่ากับ 84 , 97 , 110 , 127 และ 144 นาที ตามลำดับ

4.2.2.3 ขี้เถ้าแกลบ เมื่อผสมขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เป็นจำนวน 10 , 15 , 20 , 30 และ 40 เปอร์เซนต์ โดยน้ำหนักจะทำให้ส่วนผสมมีระยะเวลาก่อตัวเท่ากับ 94 , 102 , 108 , 121 และ 131 นาที ตามลำดับ

จากผลการทดสอบและรูปที่ 4.6 พบว่าระยะเวลาก่อตัวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณขี้เถ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 เวลาก่อตัวระยะต้น ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ

ทั้งขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ เพราะการใช้ขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะลดลงเป็นการลดสารที่จะทำปฏิกริยาไฮเดรชั่นและขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบที่เติมลงไปก็ยังไม่เกิดปฏิกริยาปัซโซลานในอายุช่วงแรกๆ นี้

4.2.3 <u>กำลังรับแรงอัด</u> กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าขนาด 50 มิลลิเมตร ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109-84

4.2.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ทราย และน้ำ ในปริมาณตามข้อกำหนดของการทดสอบ ได้ค่าดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 พบว่ากำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดที่เวลา 28 วัน เท่ากับ 350 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

4.2.3.2 ขี้เถ้าลอย กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้า ที่มีส่วนผสม ขี้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเป็นจำนวน 10 , 15 , 20 , 30 และ 40 เปอร์เซนต์ ทราย, น้ำ ในปริมาณตามข้อกำหนดของการทดสอบได้ค่าดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.7 พบว่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่ในแต่ละส่วนผสมจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแตกต่างกัน คือ กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุหลัง 28 วัน ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 , 15 และ 20 เปอร์เซนต์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นดีกว่าส่วนผสมอื่น โดยส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอย แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 เปอร์เซนต์ ให้อัตราการพัฒนากำลังดีที่สุด

4.2.3.3 ขี้เถ้าแกลบ กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมขี้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน เป็นจำนวน 10 , 15 , 20 , 30 , 40 เปอร์เซนต์ ทราย และน้ำ ในปริมาณตามข้อกำหนดของการทดสอบ ได้ค่าดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 พบว่า กำลังรับแรงอัดของตัวอย่างทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่ในแต่ละส่วนผสมจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดแตกต่างกัน คือ กำลังรับแรงอัดในช่วงอายุหลัง 28 วัน ของส่วนผสมขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนจำนวน 10 , 15 , และ 20 เปอร์เซนต์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นดีกว่าส่วนผสมอื่น โดยส่วนผสมที่มีขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 เปอร์เซนต์ จะ

ให้อัตราการพัฒนากำลังที่ดีที่สุด

ผลจากการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ พบว่าที่อายุเริ่มแรก 3 วัน และ 7 วัน กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบ ทุกๆ ส่วนผสมมีค่าต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ซึ่งกำลังรับแรงอัดนี้จะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปหลัง 28 วัน กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน โดยเมื่ออายุหลัง 28 วัน ของส่วนผสมที่มีขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ 10 , 15 , และ 20 เปอร์เซนต์ เกือบทั้งหมดจะมีค่ามากกว่าส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วน แต่ปริมาณขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบที่ไม่เหมาะสม คือ 30, 40 เปอร์เซนต์ขึ้นไป ทั้งนี้เพราะ พบว่าอัตราการพัฒนากำลังน้อยกว่าส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วนทุกระยะเวลา หรือทุกอายุของการทดสอบ

การที่ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ มีกำลังรับแรงอัดในช่วงอายุเริ่มแรกต่ำกว่า ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน นั้นอาจอธิบายได้ว่า การผสมขี้เถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง และกำลังรับแรงอัดเริ่มแรกจะขึ้นอยู่กับปฏิกริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์นี้เท่านั้น เพราะปฏิกริยาปัซโซลานของขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบยังไม่เกิดขึ้น ซึ่งกล่าวได้ว่ากำลังรับแรงอัดในอายุเริ่มแรกจะลดลงเมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง หรือกำลังรับแรงอัดในอายุเริ่มแรกจะลดลงเมื่อปริมาณขี้เถ้าในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปหลัง 28 วัน หรือ 60 วัน ผลของปฏิกริยาปัซโซลานจะมีอิทธิพลทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าผสมขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสม ปฏิกริยาปัซโซลานนี้จะชดเชยกำลังรับแรงอัดที่สูญเสียไปจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ได้

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงอัดและความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอย (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มิลลิเมตร)

ส่วนผสม	ɣ	ปริมาณ	กำลังรับแรงอัด (กก/ซม.^{2})							
ขี้เถ้าลอย:ปูนซีเมนต์	กก./ม.^{3}	น้ำ	1 วัน	3	7	14	28	60	90	180
0:100	2,140	0.560	157	230	273	313	350	380	392	429
10:90	2,174	0.540	145	233	297	316	373	437	460	488
15:85	2,175	0.535	137	235	265	292	366	405	436	442
20:80	2,151	0.535	140	201	247	308	343	401	453	482
30:70	2,148	0.530	122	175	194	266	306	368	385	405
40:60	2,141	0.520	100	166	196	222	308	351	369	388

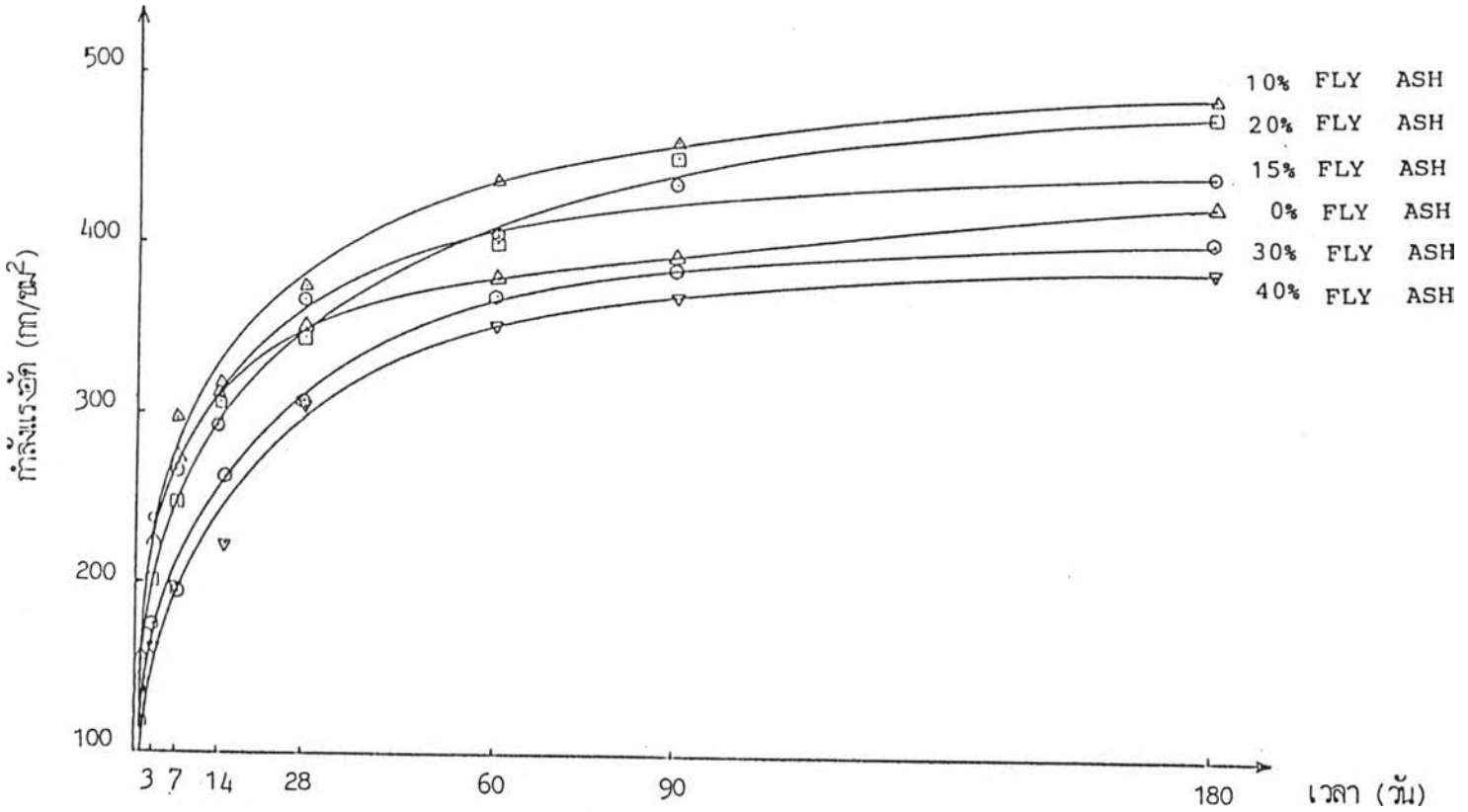
ตารางที่ 4.3 กำลังรับแรงอัดและความต้องการน้ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าแกลบ (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มิลลิเมตร)

ส่วนผสม	ɣ	ปริมาณ	กำลังรับแรงอัด (กก/ซม.^{2})							
ขี้เถ้าแกลบ:ปูนซีเมนต์	กก./ม.^{3}	น้ำ	1 วัน	3	7	14	28	60	90	180
0:100	2,140	0.560	157	230	273	313	350	380	392	429
10:90	2,155	0.600	144	243	313	378	387	439	460	495
15:85	2,125	0.615	131	187	249	279	327	366	385	403
20:80	2,123	0.640	115	191	257	299	379	403	415	435
30:70	2,069	0.670	84	115	168	213	323	253	263	297
40:60	2,018	0.710	45	76	99	141	165	177	189	220

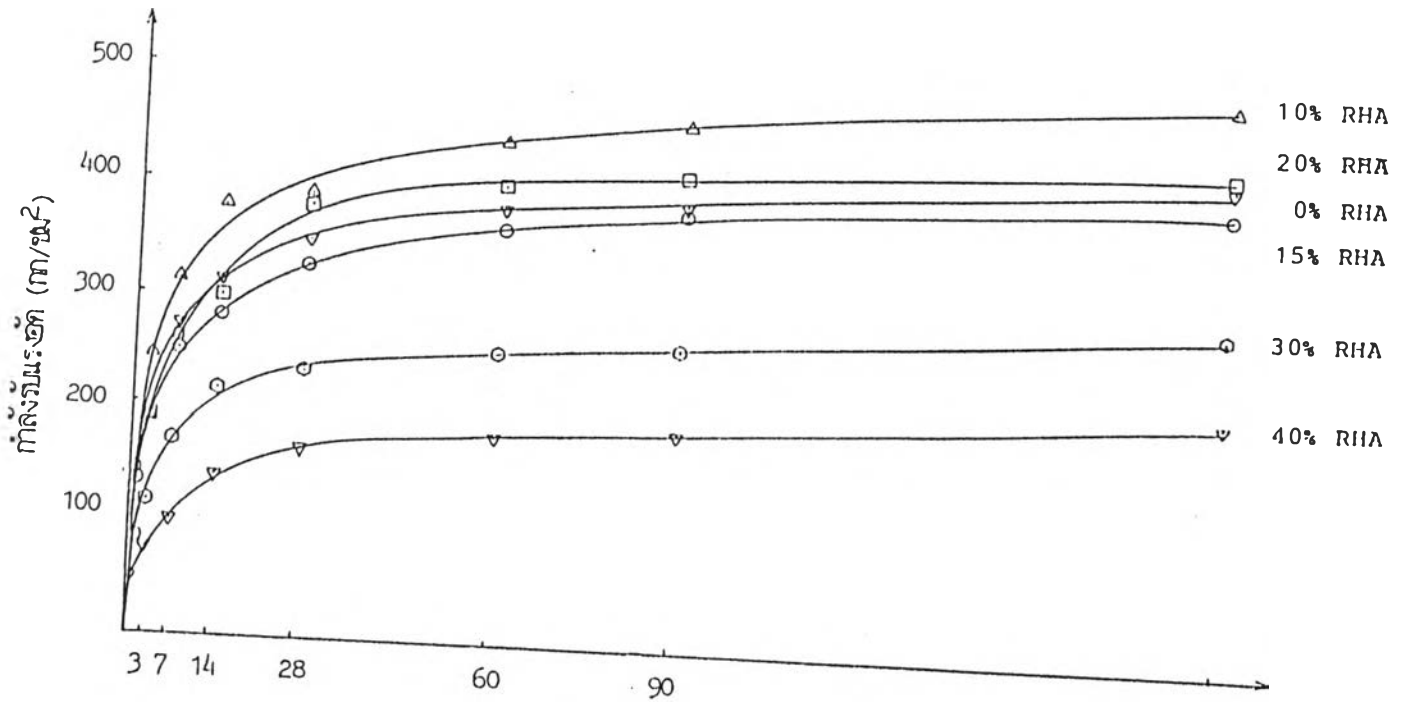
หมายเหตุ 1. ɣ หมายถึงความหนาแน่น

2. ปริมาณน้ำหมายถึง [W/(C+FLY ASH)] หรือ [W/(C+RHA)]

3. ทราย/(ปูนซีเมนต์ + ขี้เถ้า) = 2.75



รูปที่ 4.7 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาทำจากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย



รูปที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ตาร์จากปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ

4.2.4 ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานหาจากอัตราส่วนของกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของลูกบาศก์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ ต่อกำลังรับแรงอัดของลูกบาศก์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 กำลังรับแรงอัดของส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า 35 % โดยปริมาตร อายุ 28 วัน (ลูกบาศก์มอร์ต้า 50 มม.)

ส่วนผสม	ปริมาณน้ำ (กรัม)	($กก./ม.^3$)	กำลังรับแรงอัด ($กก./ซม.^2$)	ดัชนี (%)
ปูนซีเมนต์ล้วน	140	2,166	343	100
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย	130	2,149	306	89.2
ปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ	160.5	2,043	265	77.3

$$\text{ค่าดัชนีปัซโซลาน} = \frac{\text{กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า}}{\text{กำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ล้วน}} \times 100$$

$$\text{ค่าปริมาณน้ำที่ต้องการ} = \frac{\text{ปริมาณน้ำในส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า}}{\text{ปริมาณน้ำในส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วน}} \times 100$$

4.2.4.1 ขี้เถ้าลอย ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานของขี้เถ้าลอยมีค่าเท่ากับ 89.2 เปอร์เซนต์ และค่าปริมาณน้ำที่ต้องการมีค่า เท่ากับ 93 เปอร์เซนต์ จากมาตรฐาน ASTM C 618 - 85 ตามตารางที่ 2.2 พบว่า ขี้เถ้าลอยเป็นสารประกอบของวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติในช่วงกำหนด ชนิด F

4.2.4.2 ขี้เถ้าแกลบ ค่าดัชนีความเป็นปัซโซลานของขี้เถ้าแกลบมีค่าเท่ากับ

77.3 เปอร์เซนต์ และค่าปริมาณน้ำที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 115 เปอร์เซนต์ จากมาตรฐาน ASTM C 618 - 85 ตามตารางที่ 2.2 พบว่า ขี้เถ้าแกลบเป็นสารประกอบวัสดุซีเมนต์ธรรมชาติในช่วงกำหนดชนิด N

4.2.5 ผล X - Ray Diffraction

การวิเคราะห์โดยวิธี X - Ray Diffraction เพื่อพิจารณาสารประกอบในส่วนผสม สามารถแยกการแสดงผลได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าแกลบ
2. ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย และส่วนผสมของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ

4.2.5.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

รูปที่ 4.9 แสดง Diffraction Diagram ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งพบสารประกอบที่สำคัญ คือ ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไทรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) โดยมี Diffraction Peak สูงสุด ดังนี้

C_2S ที่ 2θ = 34.37° ค่า Intensity = 508

C_3S ที่ 2θ = 32.22° ค่า Intensity = 625

นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มของสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ที่ 2θ = 18.09° ซึ่งแสดงว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ได้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น กับความชื้นในอากาศบ้างแล้ว

รูปที่ 4.10 แสดง Diffraction Diagram ของขี้เถ้าลอย ซึ่งพบส่วนประกอบสำคัญ คือ ซิลิก้า (SiO_2) และเหล็ก (Fe_2O_3) สำหรับส่วนประกอบอื่น ๆ ไม่เด่นชัด โดยมีบางส่วนอยู่ในรูปของสารอสัณฐาน (Amorphous) ทั้งนี้สามารถพิจารณาได้จาก Base Line ของ Diagram ในช่วงระหว่างมุม 2θ = 10° ถึง 40° ที่มีลักษณะเป็นรูปเนินเขา ซึ่งเป็นรูปแบบของสารอสัณฐาน

รูปที่ 4.11 แสดง Diffraction Diagram ของขี้เถ้าแกลบ ซึ่งพบว่า Diffraction Peak ส่วนใหญ่เป็นของ ซิลิก้า (SiO_2) และพบว่า Base Line ของ Diagram ในช่วงระหว่าง 2θ = 10° ถึง 40° มีลักษณะเป็นเนินเขา เช่นเดียวกับของขี้เถ้าลอย แต่มีขนาดใหญ่กว่า แสดงว่าขี้เถ้าแกลบมีสารอสัณฐานจำนวนมากกว่าในขี้เถ้าลอย ซึ่งสารอสัณฐานนี้จะเป็นผลจากการที่วัสดุถูกเผาที่อุณหภูมิสูง หรือถูกเผาในระยะเวลานาน

4.2.5.2 <u>ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย หรือขี้เถ้าแกลบ</u>

Diffraction Diagram จากการวิเคราะห์ตัวอย่างปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย และปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบนี้ จะพิจารณาสารประกอบที่สำคัญคือ ไดคัลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไทรคัลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C-S-H) ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสาน ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปัซโซลาน

รูปที่ 4.12 แสดง Diffraction Diagram ของตัวอย่างที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วนไม่ได้ผสมขี้เถ้า ที่ระยะเวลาบ่ม 1 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน ซึ่งพบว่า Diffraction Peak ของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ คือ C_2S และ C_3S จะลดลงเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาการบ่ม ในขณะที่สารประกอบ C-S-H ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และเป็นสารประกอบที่ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการพัฒนากำลัง จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม

รูปที่ 4.13 ถึง 4.16 แสดง Diffraction Diagram ของส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อขี้เถ้าลอยที่ 10:90 , 15:85 , 20:80 และ 30:70 ตามลำดับ โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาที่การบ่ม 1 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน ซึ่งพบว่าลักษณะของ Diffraction Diagram ของส่วนผสมที่ปริมาณขี้เถ้าลอยต่าง ๆ จะมีรูปแบบสอดคล้องกับของปูนซีเมนต์ล้วน (รูปที่ 4.12) แต่ค่า Intensity ของ Diffraction Peak จะแตกต่างกันโดยเฉพาะของสารประกอบคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (C - S - H) ในช่วงอายุแรกจะต่ำลงกว่าของส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วนที่อายุเดียวกันตามปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอายุหลังที่ 90 วัน จะพบว่า Diffraction Peak ของ (C-S-H) ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย จะมากกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ยกเว้นที่ส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 30:70 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ล้วนทุกช่วงอายุ ดังนั้นอาจพิจารณาได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ว่า ในช่วงอายุแรก สารประกอบ (C-S-H) เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเท่านั้น เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมลดลง และปริมาณขี้เถ้าลอยเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยลง จึงมี Diffraction Peak ลดลง ตามปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้น แต่ในช่วงอายุหลังสารประกอบ (C-S-H) จะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปัซโซลานร่วมกันทำให้ส่วนผสมที่มีขนาดเหมาะสมเกิด Diffraction Peak ของสารประกอบ (C-S-H) มากกว่าของส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วน

รูปที่ 4.17 ถึง 4.19 แสดง Diffraction Diagram ของส่วนผสมปูนซีเมนต์ล้วน ต่อขี้เถ้าแกลบ 10:90 , 15:85 และ 20:80 ตามลำดับ โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาการบ่มที่ 1 วัน 14 วัน 28 วัน และ 90 วัน ซึ่งพบว่าลักษณะของ Diffraction Diagram ของส่วนผสมที่มีปริมาณขี้เถ้าแกลบต่าง ๆ มีรูปแบบและผลในทำนองเดียวกันกับของส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย

4.2.6 <u>การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้า</u>

เนื่องจากสารประกอบคัลเซี่ยมซิลิเกตไฮเดรท (C - S - H) มีผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลัง ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสารประกอบ C - S - H ในส่วนผสมที่ปริมาณและระยะเวลาบ่มต่าง ๆ จากหลักการของการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Diffraction ซึ่งประเมินปริมาณของสารประกอบในส่วนผสมให้แปรผันโดยตรงกับค่า Intensity ของ Diffraction Peak ของสารประกอบนั้น และในการศึกษาได้กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ของเครื่อง X-Ray ที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มีค่าคงที่ กล่าวคือเหมือนกันทุก ๆ ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์จึงจะเทียบกับการแปรเปลี่ยน Diffraction intensity ของสารประกอบ C - S - H ที่ได้จาก Diffraction diagram ของส่วนผสมนั่น ๆ

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงว่า Intensity ของ C - S - H ของส่วนผสมปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ ที่ปริมาณและเวลาบ่มต่าง ๆ กัน ตามลำดับ โดยพิจารณา Diffraction peak ที่สูงสุดของ C - S - H (ที่ $2\theta = 18.09^{\circ}$) ซึ่งพบว่า ค่า C - S - H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าในปริมาณต่าง ๆ จะพัฒนาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่บ่ม แต่ในปริมาณขี้เถ้าที่เหมาะสมคือ 10 ถึง 20% จะมีการพัฒนา C - S - H ในช่วงอายุแรก (1 วัน 14 วัน และ 28 วัน) น้อยกว่าปูนซีเมนต์ล้วน แต่ในช่วงอายุหลัง กล่าวคือ ที่ระยะเวลาบ่มส่วนผสมปูนซีเมนต์และ

ขี้เถ้า 90 วันจะให้ค่า Diffraction intensity ของ C - S - H มากกว่าของปูนซีเมนต์ล้วน ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาปัซโซลานของขี้เถ้า

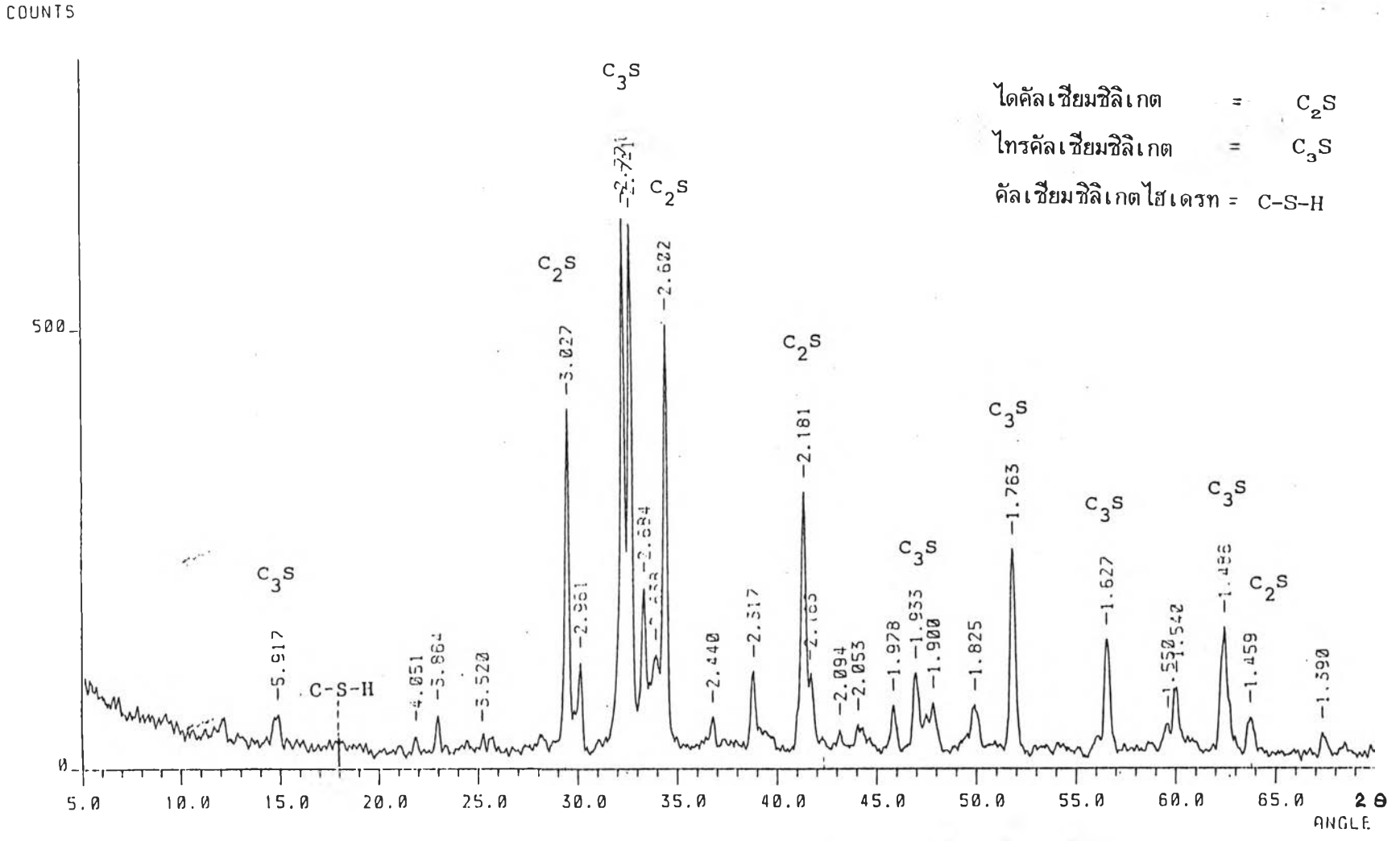
ผลดังกล่าวแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า Intensity ของ C - S - H และปริมาณขี้เถ้าที่อายุการบ่มต่าง ๆ ตามรูปที่ 4.22 และ 4.23 สำหรับขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบตามลำดับ ซึ่งพบว่า ในอายุช่วงแรกที่เวลาบ่ม 1 ถึง 28 วัน อัตราการเกิด C - S - H จะลดลงตามปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้น เพราะในช่วงอายุแรกสารประกอบ C - S - H จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเท่านั้น ขณะที่ปฏิกิริยาปัซโซลานยังไม่เกิด แต่ในช่วงอายุหลังที่ 90 วัน พบว่าสารประกอบ C - S - H จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 20% เพราะเกิดสารประกอบ C - S - H จากปฏิกิริยาปัซโซลานช่วยเสริมมากขึ้น แต่ถ้าผสมขี้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์มากเกินไปมากกว่า 20% จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเหลือน้อย สารประกอบ C - S - H จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดขึ้นน้อย ในช่วงอายุหลังสารประกอบ C - S - H จากปฏิกิริยาปัซโซลานที่เกิดขึ้นไม่สามารถชดเชยได้เพียงพอ ทำให้การพัฒนากำลังมีแนวโน้มลดลง

ดังนั้นจากการพิจารณาสารประกอบ C - S - H โดยวิธี X-Ray Diffraction อาจประเมินได้ว่าปริมาณขี้เถ้าที่เหมาะสมในการใช้ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยให้คุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดในอายุช่วงหลังได้ดี คือประมาณ 20% โดยน้ำหนัก

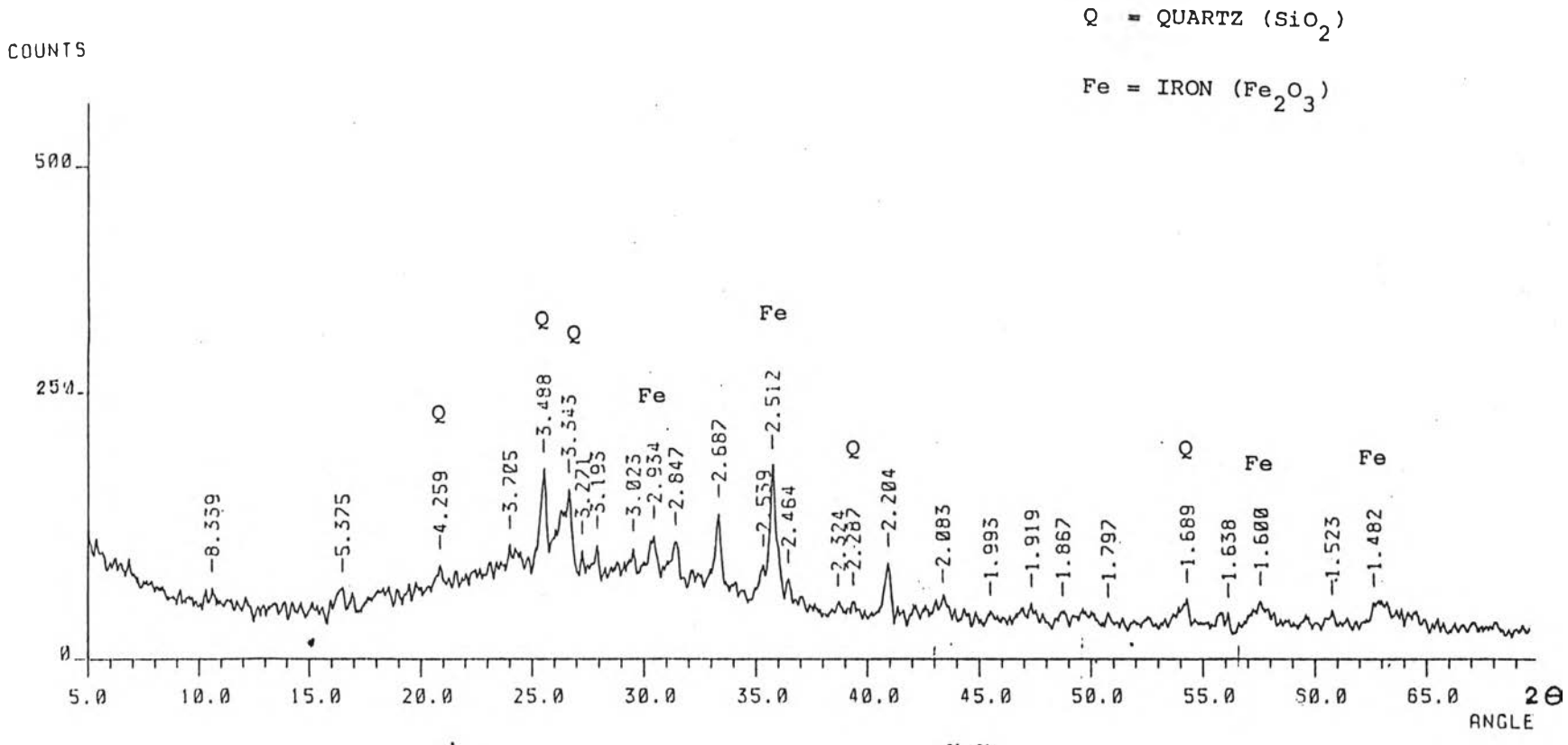
4.2.7 <u>การเปรียบเทียบระหว่างขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ</u>

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ โดยวิธี X-Ray Diffraction ตามหัวข้อที่ 4.25 และ 4.26 สามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลระหว่างขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ เมื่อนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมที่ปริมาณเท่ากัน

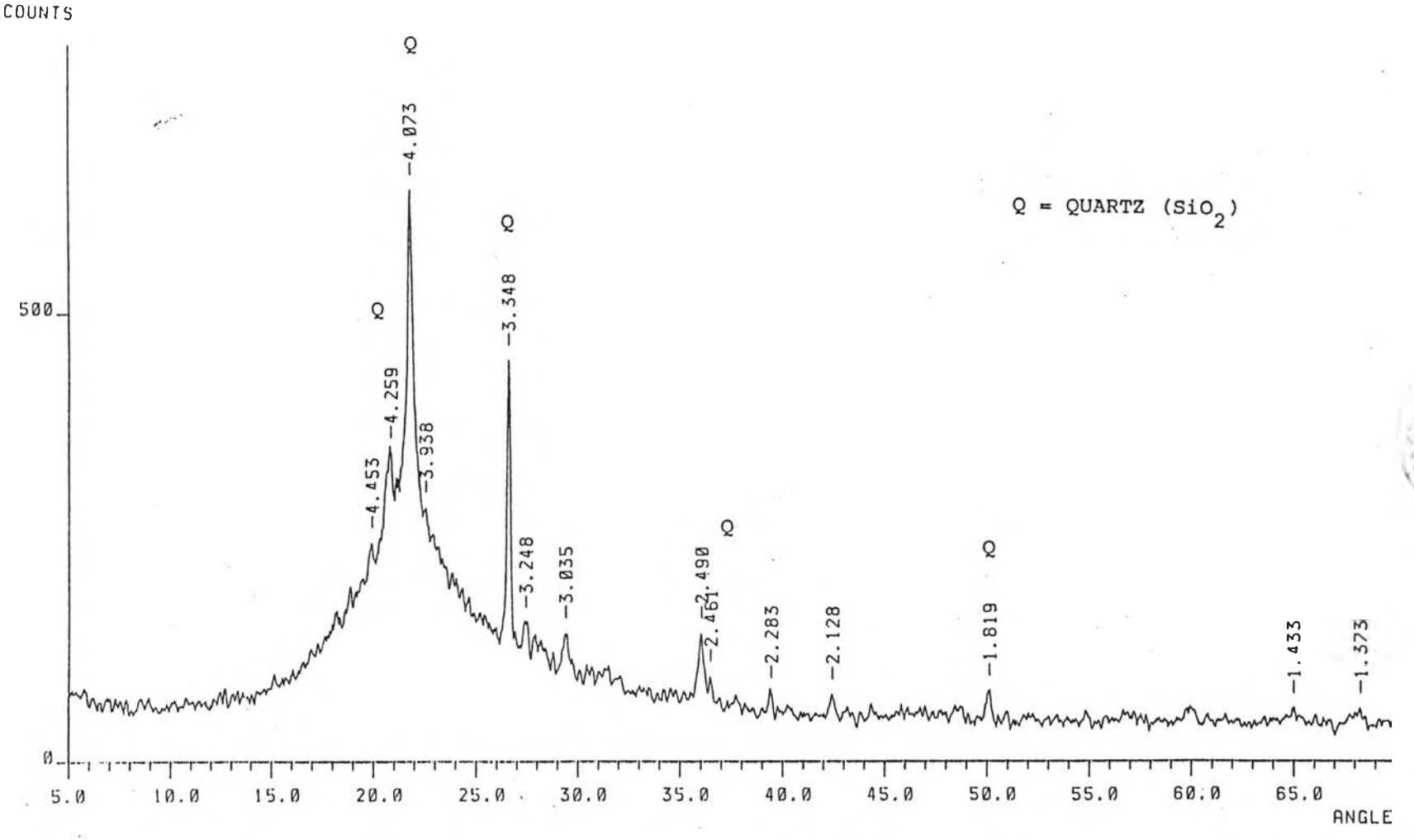
รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงปริมาณของสารประกอบ C - S - H ที่ระยะเวลาบ่มต่าง ๆ ของส่วนผสมเมื่อแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ 10% และ 20% โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่า diffrcation intensity ของสารประกอบ C - S - H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย และขี้เถ้าแกลบ มีค่าใกล้เคียงกันโดยขี้เถ้าลอยมีแนวโน้มที่ให้ค่ามากกว่าขี้เถ้าแกลบเล็กน้อย ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตามตารางที่ 4.2 และ 4.3



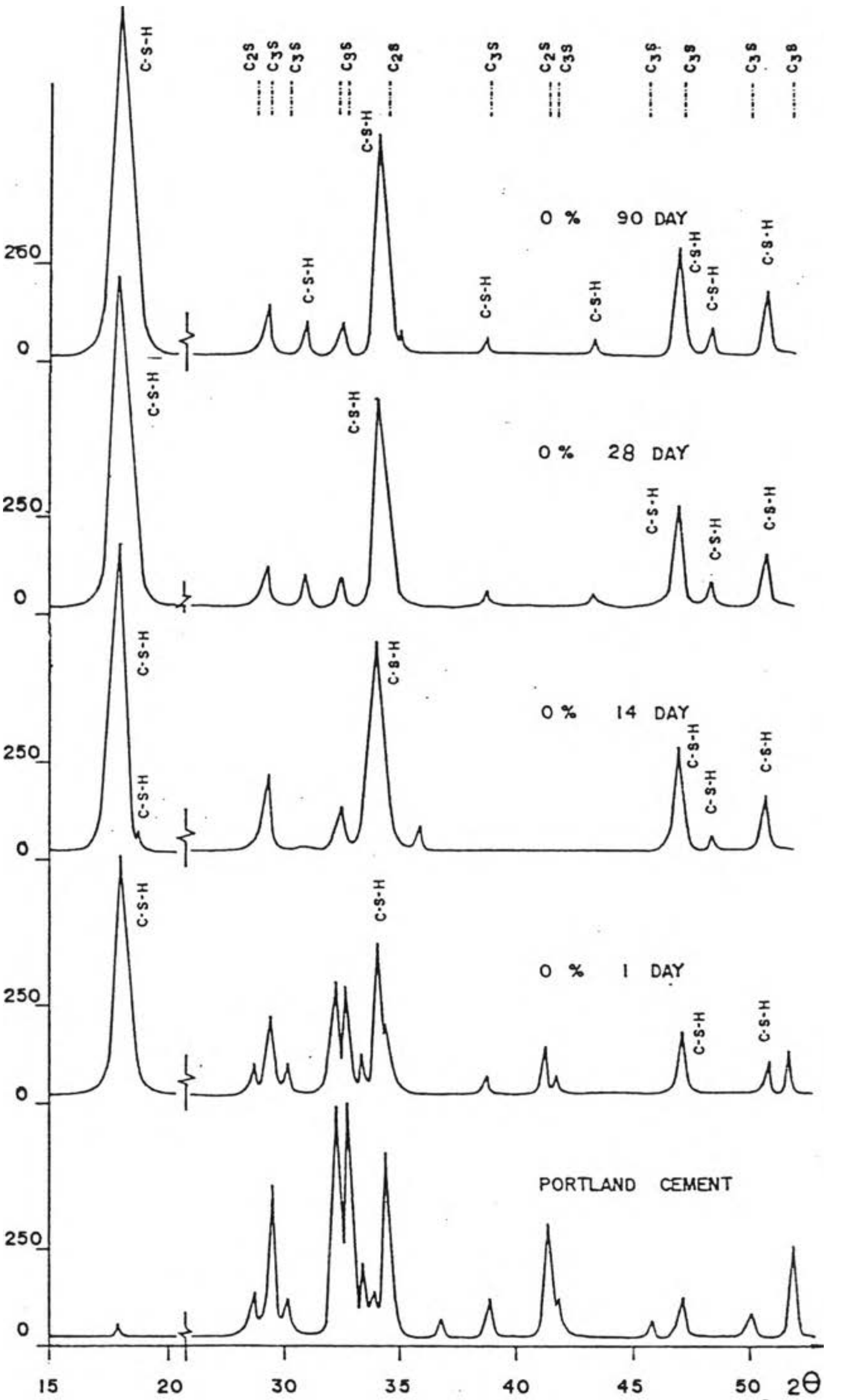
รูปที่ 4.9 ผล X - Ray Diffraction ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



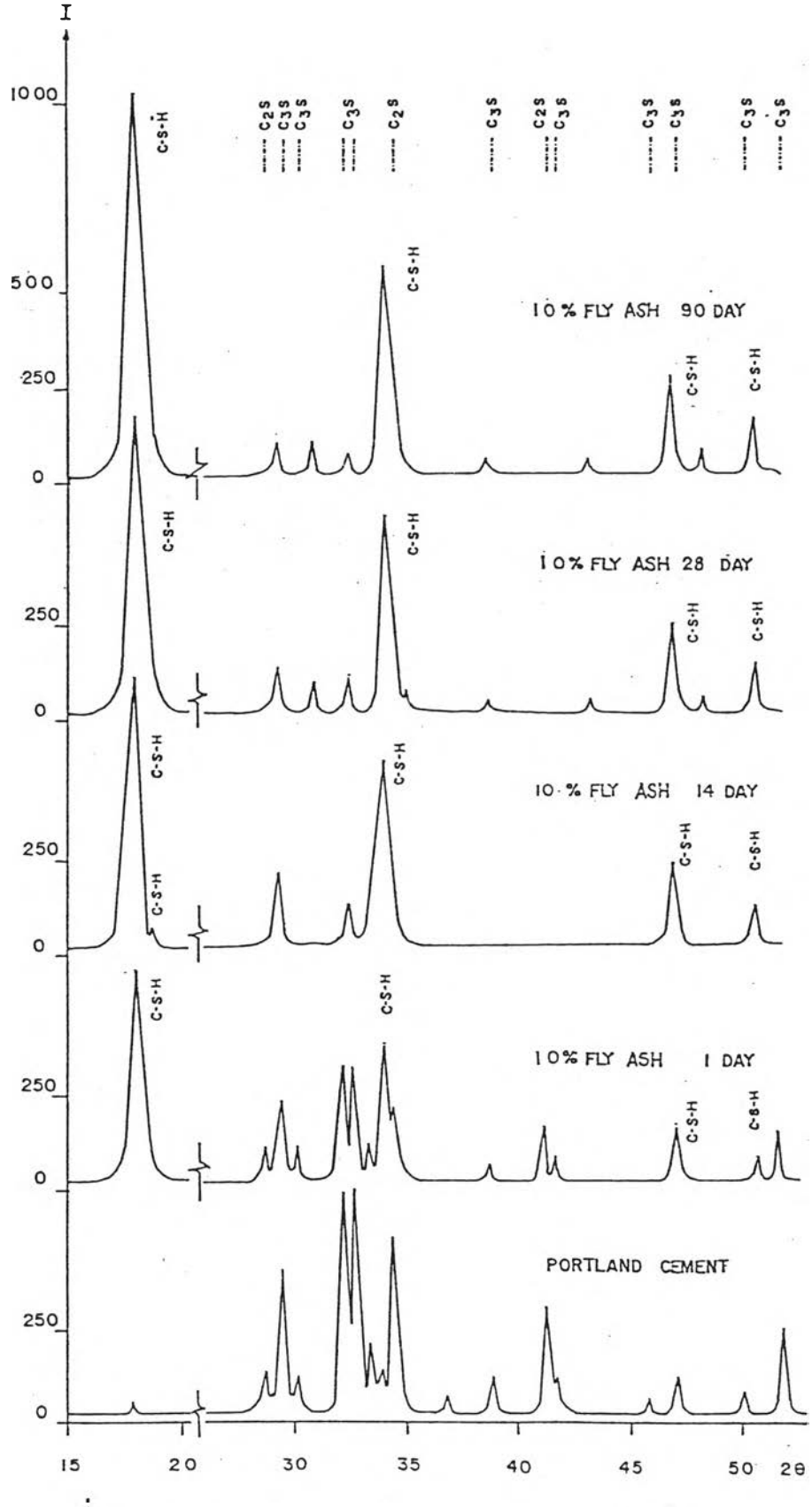
รูปที่ 4.10 ผล X - Ray Diffraction ของขี้เถ้าลอย



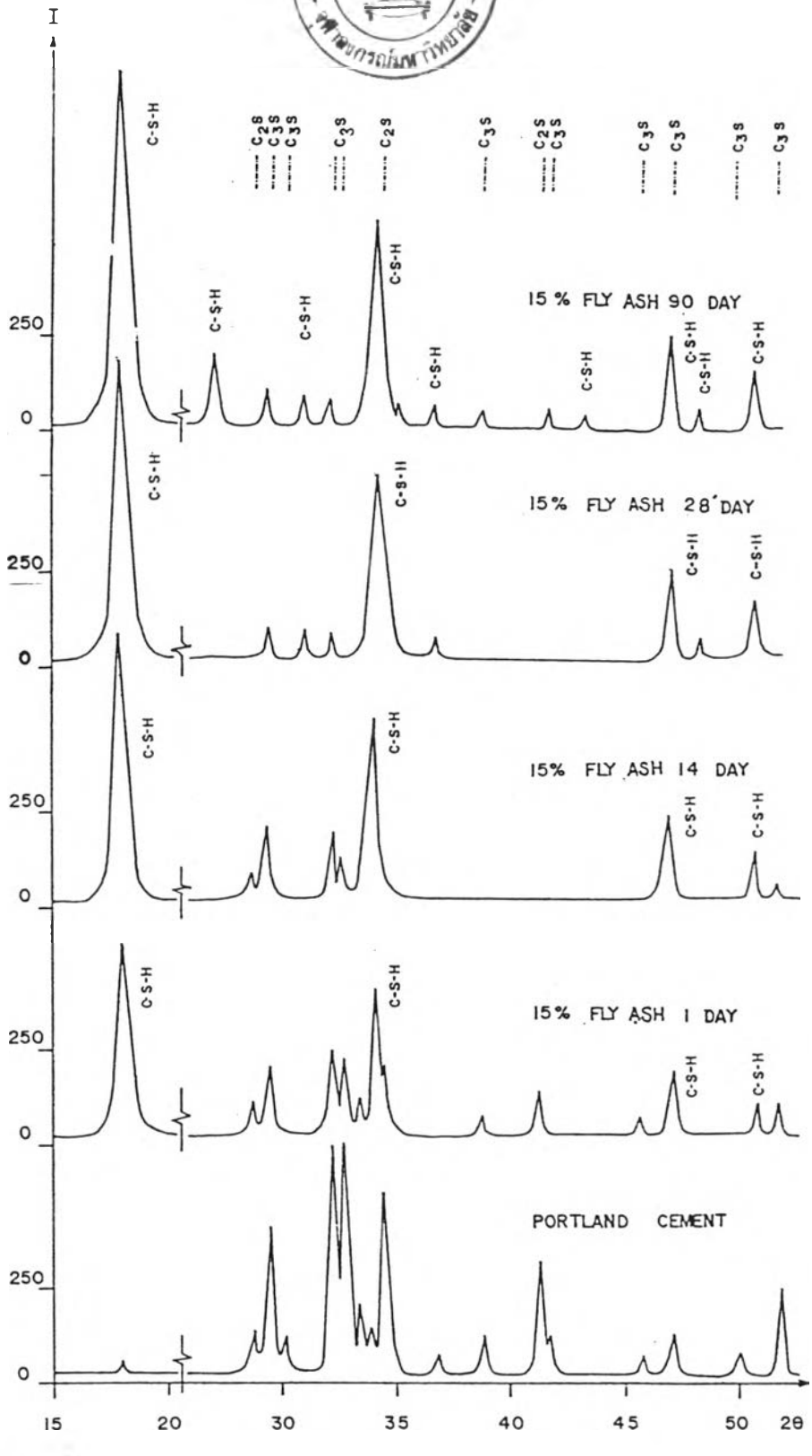
รูปที่ 4.11 ผล X - Ray Diffraction ของขี้เถ้าแกลบ



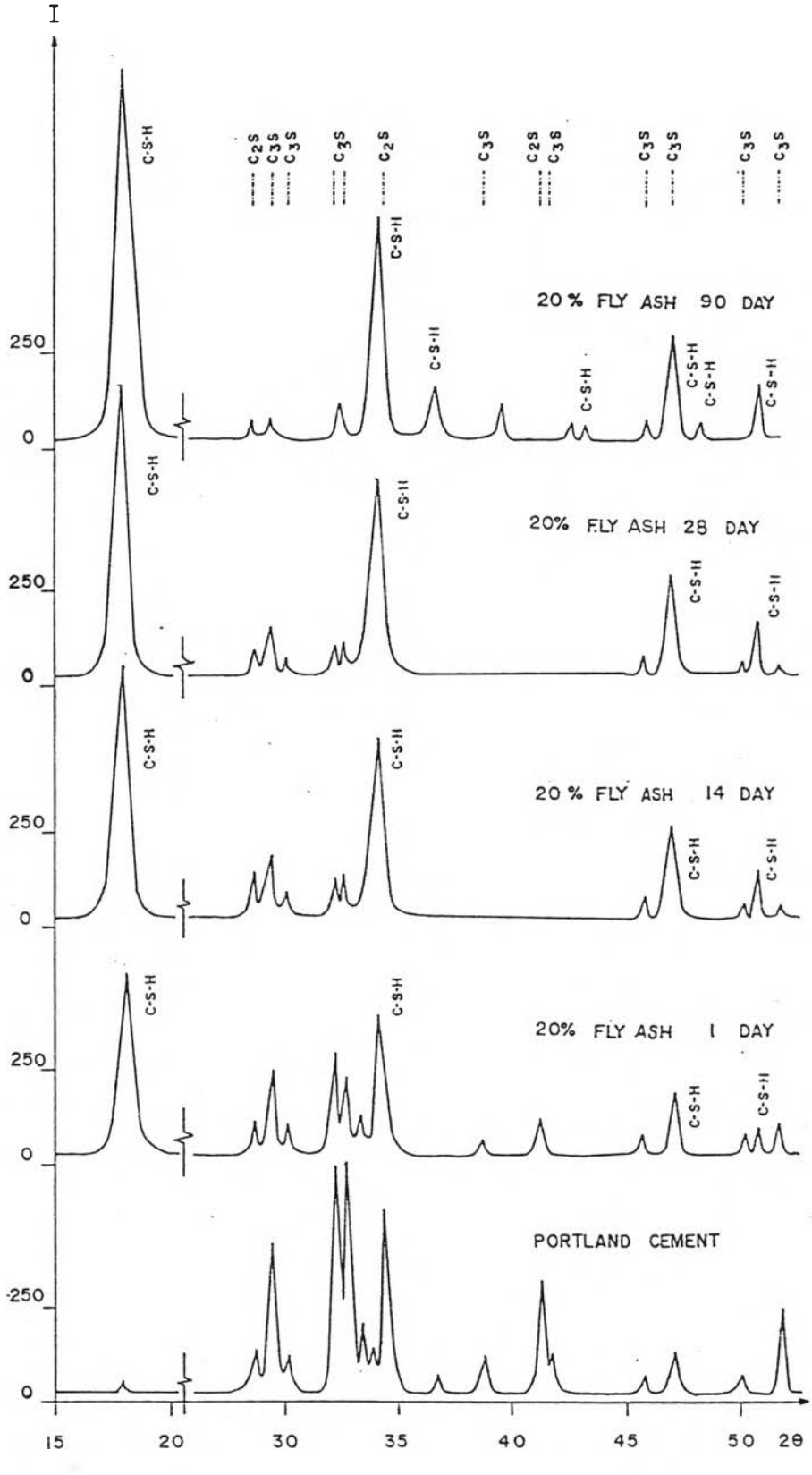
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าต่อปูนซีเมนต์ 0 : 100 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



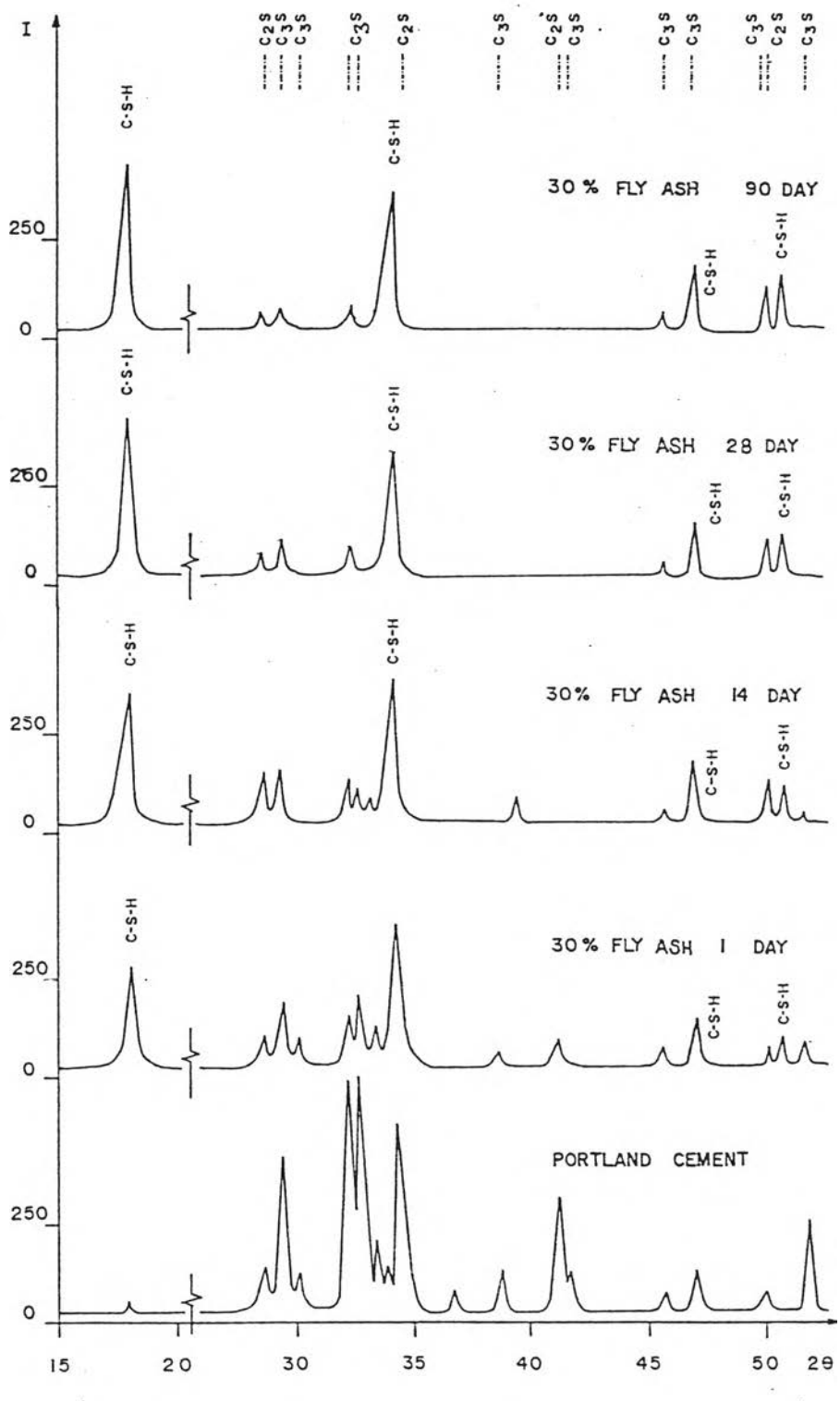
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมซีเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 10 : 90 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



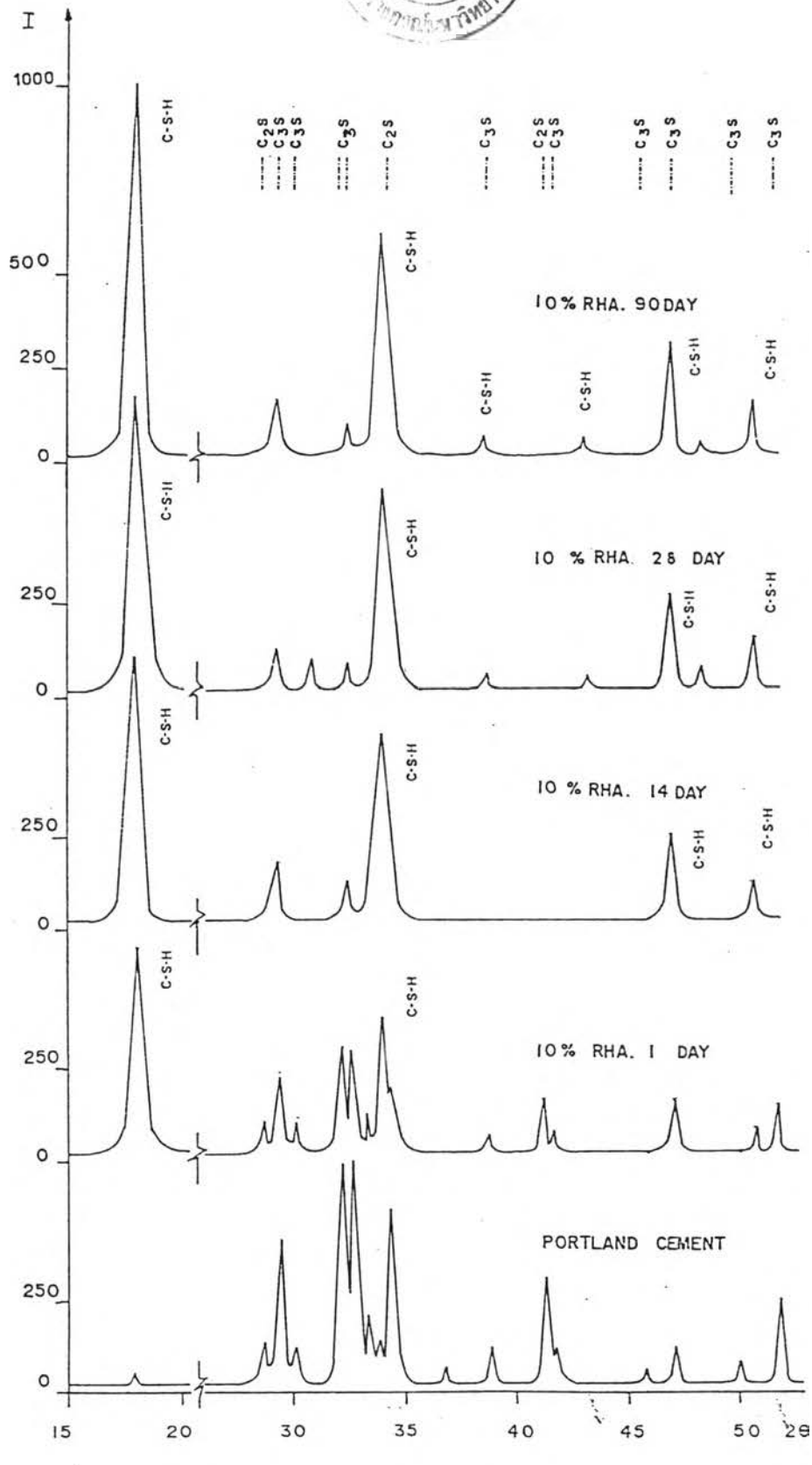
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 15 : 85 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



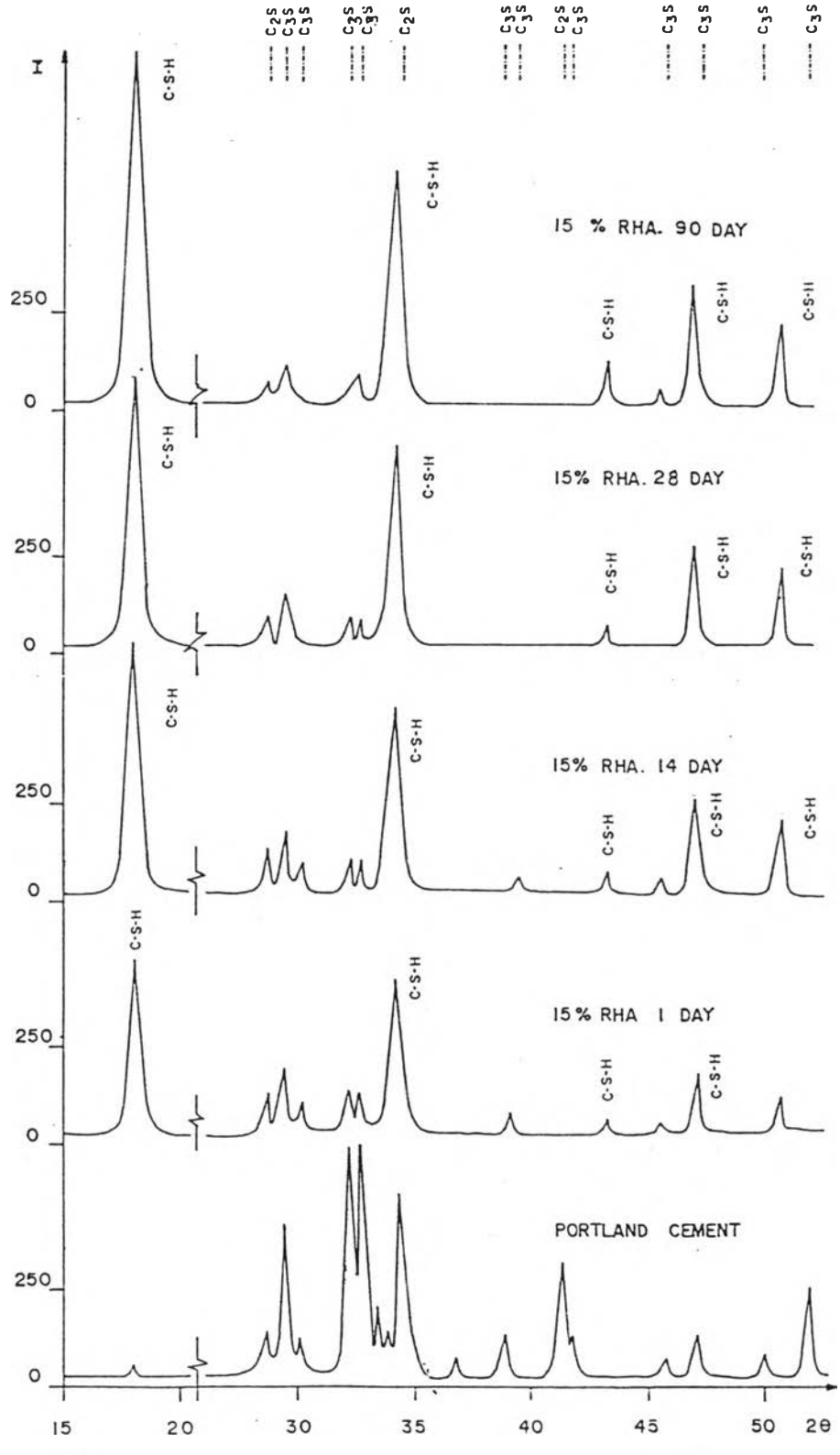
รูปที่ 4.15 ภราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซิเมนต์ 20 : 80 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



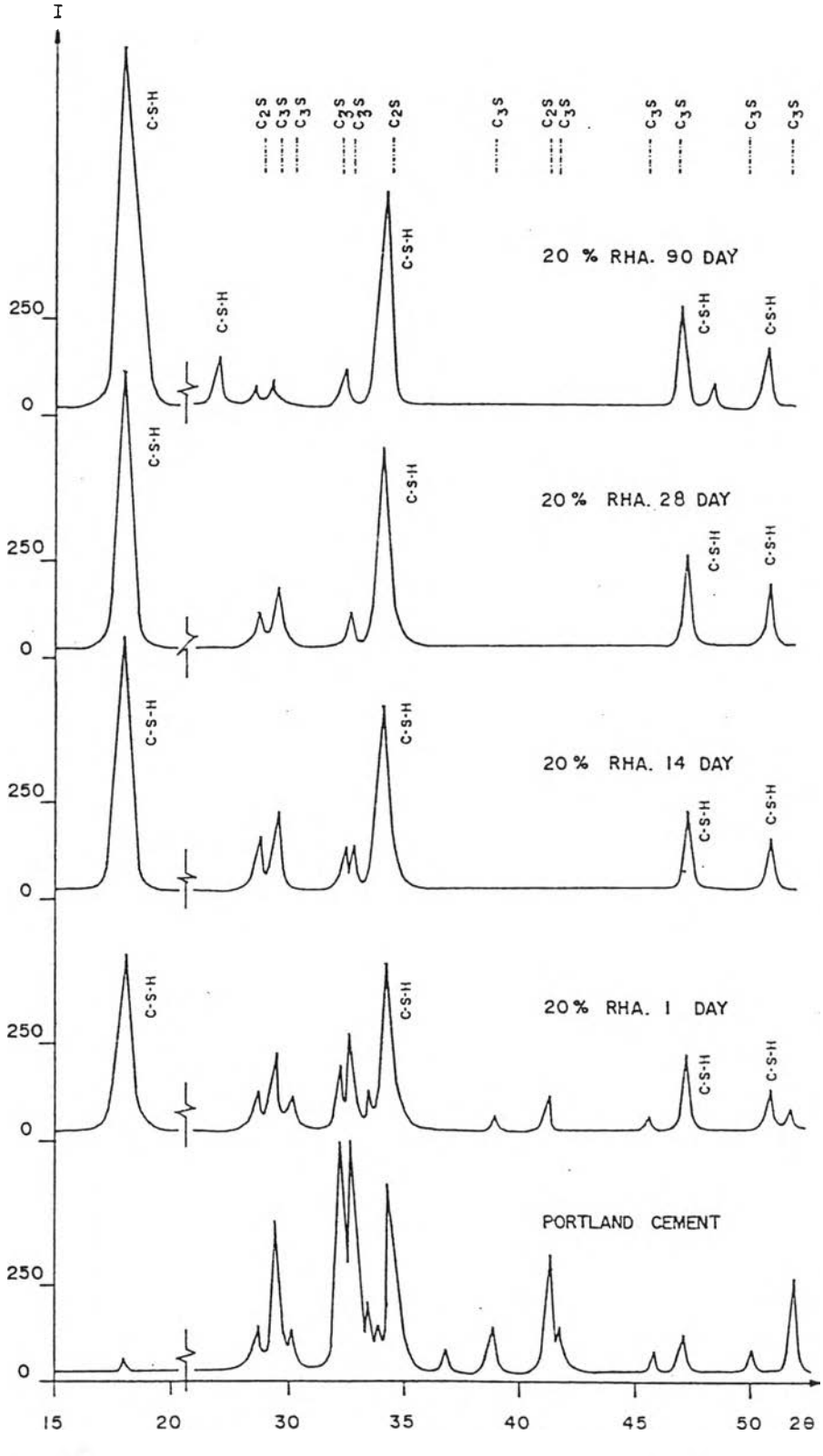
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาของส่วนผสมขี้เถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ 30 : 70 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



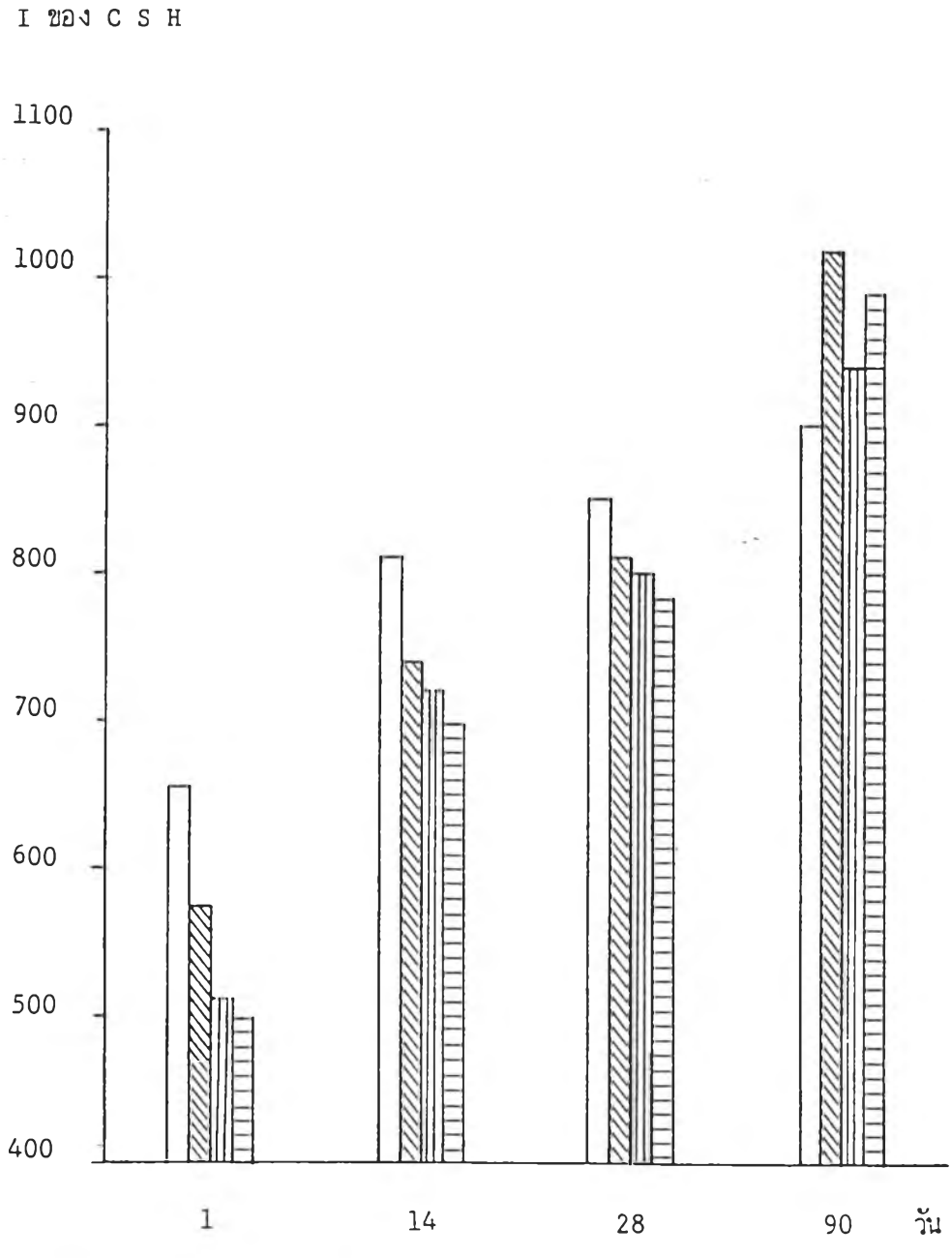
รูปที่ 4 17 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมซิลิก้าเกลบด่อปูซิเมนต์ 10 : 90 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



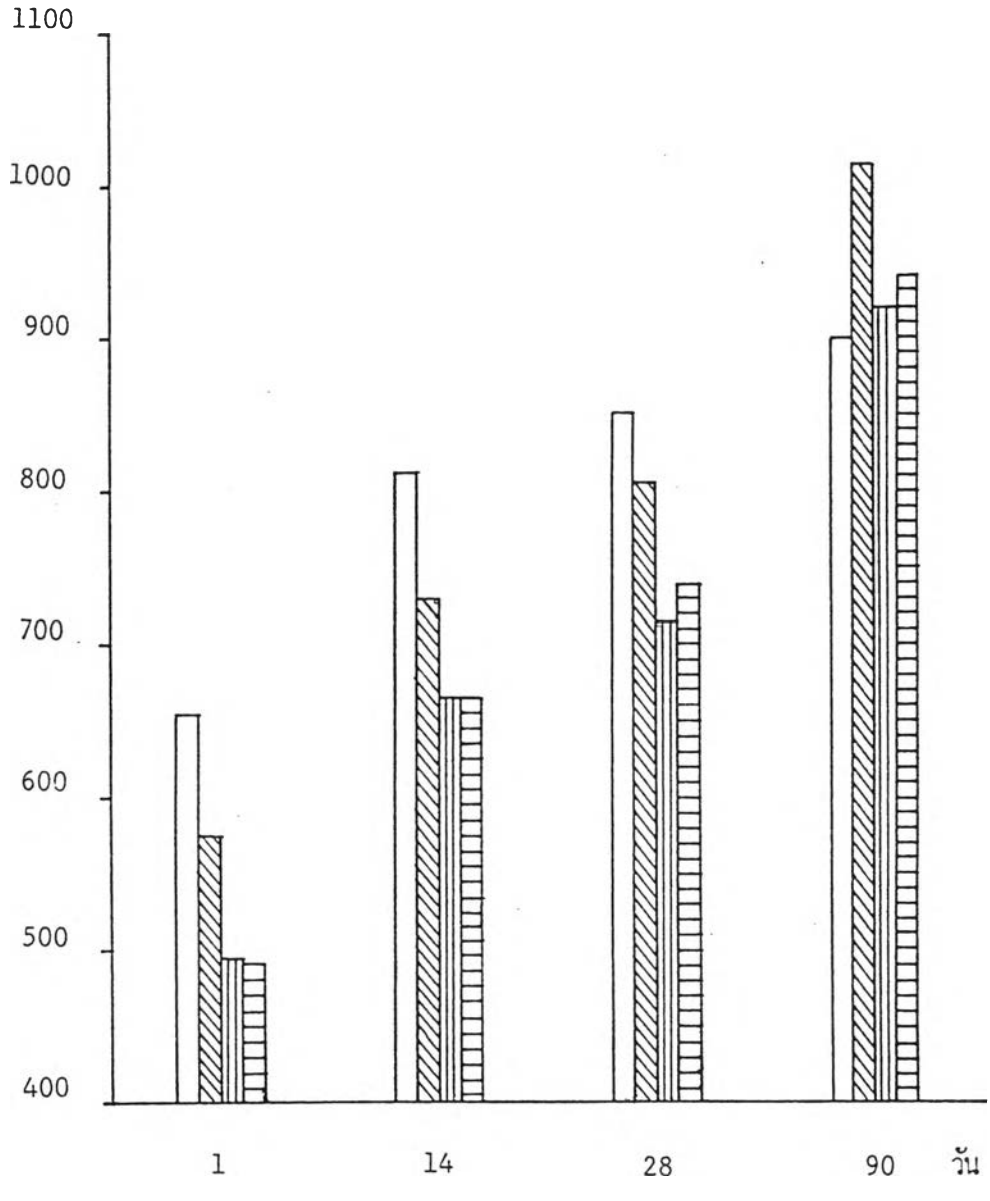
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมซิลิก้าแกลบต่อปูซีเมนต์ 15 : 85 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการพัฒนา Calcium Silicate Hydrate ที่เพิ่มขึ้นตามเวลาบ่ม ของส่วนผสมซีเถ้าแกลบต่อปูนซีเมนต์ 20 : 80 และ Portland Cement โดย X-Ray Diff.



รูปที่ 4.20 อัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสาน C S H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอย



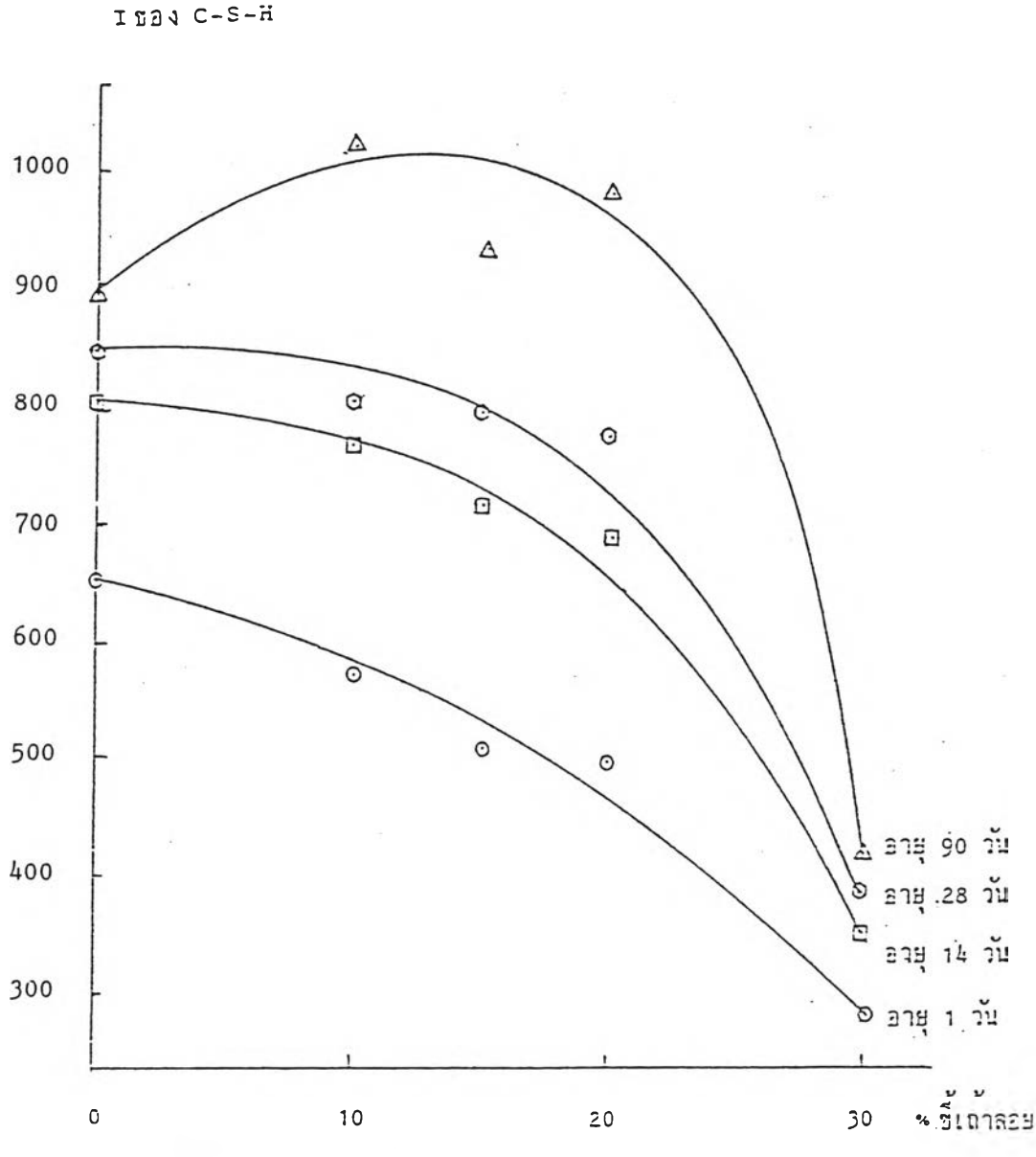
รูปที่ 4.21 อัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสาน C S H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าแกลบ

0 %

10 % R H A

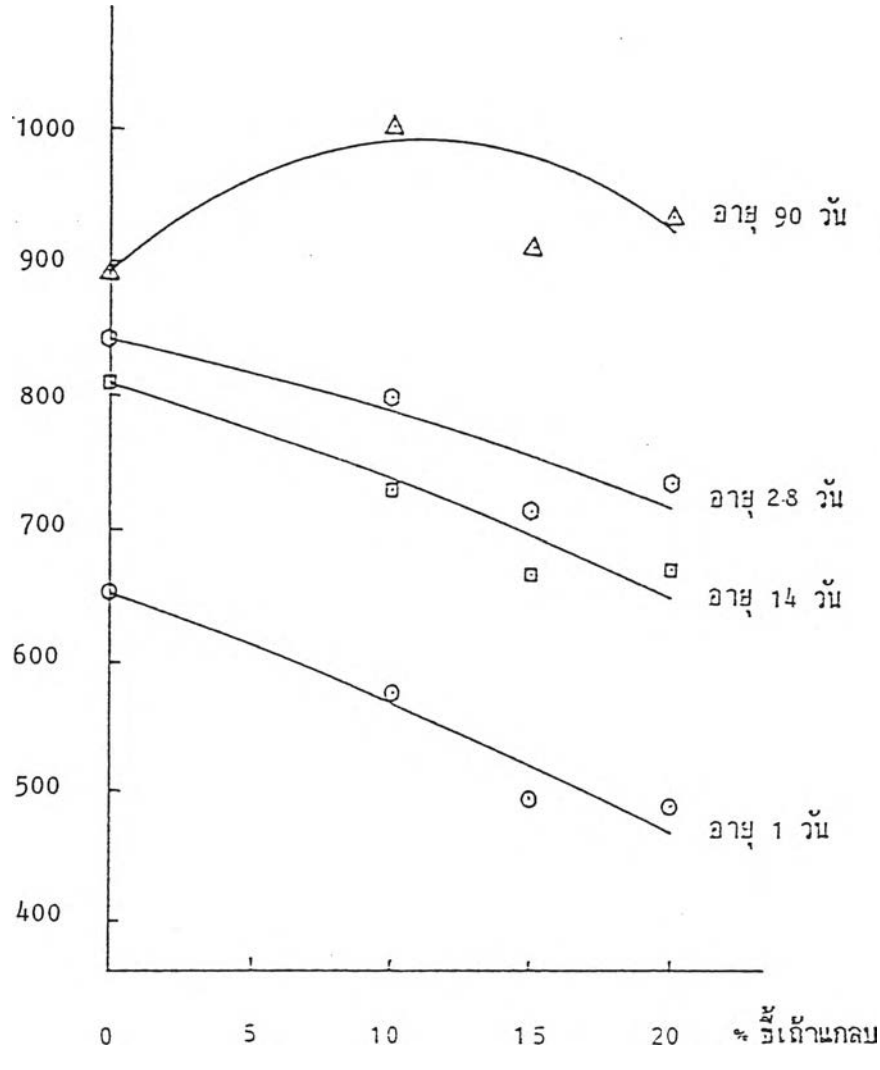
15 % R H A

20 % R H A

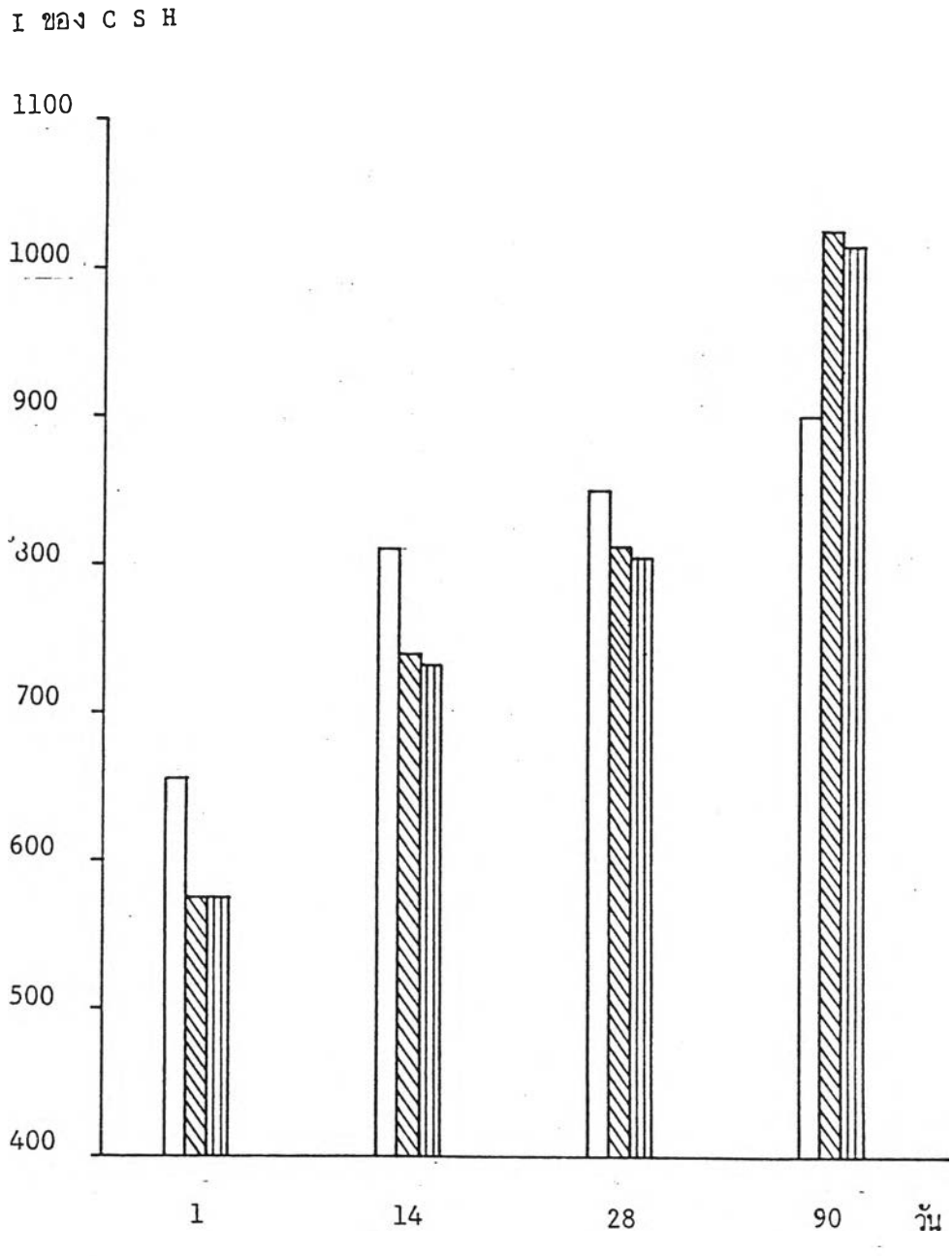


รูปที่ 4.22 อิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าลอยเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ต่ออัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสานในอายุช่วงแรกและอายุช่วงหลัง

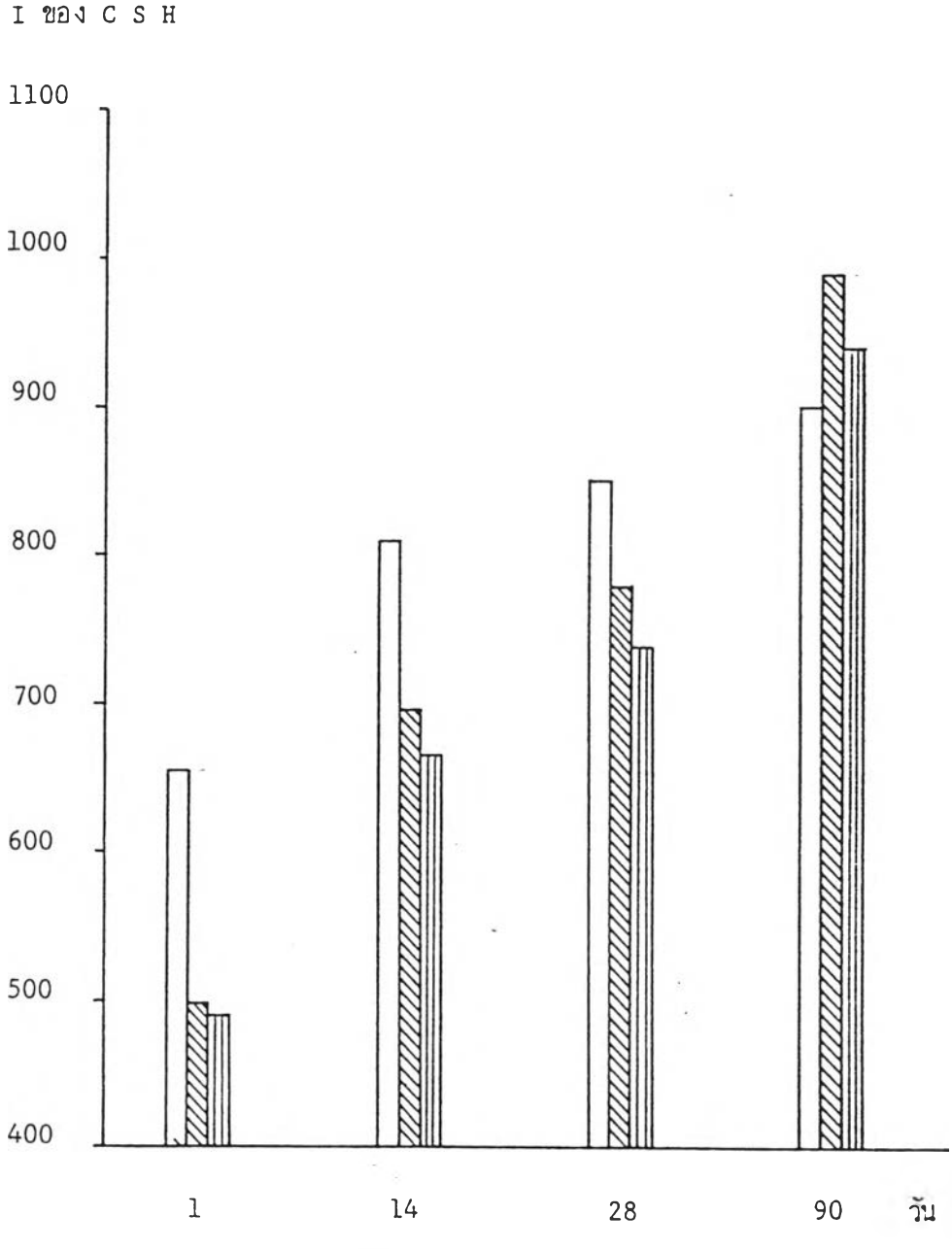
ไ ธอง C-S-H



รูปที่ 4.23 อิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าแกลบเมื่อผสมในปูนซีเมนต์ต่ออัตราการพัฒนาสารเชื่อมประสานในอายุช่วงแรกและอายุช่วงหลัง



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบอัตราการเกิดสารเชื่อมประสาน C S H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ 10 %



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบอัตราการเกิดสารเชื่อมประสาน C S H ของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยหรือขี้เถ้าแกลบ 20 %